МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп’ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КСУ
_____ П.В. Леонтьєв
_____ _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 151- Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

на тему: "Автоматизована система стабілізації кулеметної турелі"

Керівник роботи
к.т.н. Леонтьєв П.В.

Дипломник
студент гр. СУ.м-11 Лелюх О.М.

Суми – 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра комп’ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КСУ
_____ П.В. Леонтьєв
_____ _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

кваліфікаційної магістерської роботи

Лелюха Олександра Миколайовича

Дипломник:

Студент гр. СУ.м – 11 Лелюх О.М.

Керівник проекту:

к.т.н., Леонтьєв П.В.

Суми – 2022

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система стабілізації кулеметної турелі», затверджена наказом ректора СумДУ № 1027-VI від " 07 " листопада 2022 р.

2. Термін здавання студентом закінченого проекту “23” грудня 2022р.

3. Вихідні дані до проекту: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалами опису і автоматизації технологічного процесу відповідної установки.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз сучасного стану роботизованих платформ, системи стабілізації озброєння; електромеханічні системи стабілізації, функціональні можливості різних типів систем, вибір об’єкта і предмету дослідження, висновки та постановка завдання для дослідження; класична система стабілізації: ознайомитися з методами налаштування регуляторів та описання системи шляхом математичних перетворень основних особливостей елементів системи, аналіз контурів електропривода, контур керування системою, моделювання системи в середовищі Matlab, аналіз отриманих даних та порівняння з класичною системою. Формулювання вимог експлуатації: синтез вимог до середовища експлуатації, рекомендації щодо вдосконалення системи.

5. Перелік графічних матеріалів: рисунки, додатків.

6. Календарний план проектування.

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Підбір та аналіз літератури і першоджерел	01.09.2022-16.09.2022
2	Аналіз сучасних систем стабілізації на автономних роботах	17.09.2022-20.09.2022

3	Ознайомлення з роботою системи стабілізації та аналіз ефективності існуючих систем	21.09.2022- 03.10.2022
4	Дослідження контуру стабілізації озброєння на рухомій платформі	04.10.2022- 06.11.2022
5	Вибір технічних засобів для системи стабілізації, розробка основних схем та принципів системи	07.11.2022- 23.11.2022
6	Проведення кошторису	24.11.2022- 06.12.2022
7	Оформлення кваліфікаційної магістерської роботи	06.12.2022- 23.12.2022

7. Дата видачі завдання " 01 " вересня 2022 р.

Керівник проекту:

К.т.н., Леонтьєв П.В.

До виконання прийняв:

студент гр. Су.м-11 Лелюх О.М.

РЕФЕРАТ

Лелюх Олександр Миколайович. Система стабілізації озброєння автономного робота. Кваліфікаційна магістерська робота. Сумський державний університет. Суми, 2022 р.

Робота містить 60 аркуші, що включає 44 сторінки звіту, 6 креслення, 32 рисунки, 37 формул. При виконанні дипломного проекту було використано 29 літературних джерел.

В магістерській роботі об’єктом дослідження було обрано систему стабілізації озброєнням рухомої платформи, предметом дослідження стало – керування робочими органами системи стабілізації.

За мету роботи ставилося проаналізувати роботу системи стабілізації озброєння мобільного робота спеціального призначення, виявити недоліки та проблеми вже існуючих систем та вдосконалити методи стабілізації положення в просторі об’єкту.

В процесі аналізу відкритих джерел та проектів існуючих наземних безпілотних дронів біло виявлено низку проблем. Основною проблемою систем стабілізації озброєння є невелика швидкодія системи яка пов’язана із великою масою системи наведення та недосконалим принципом стабілізації системи. Так як класичні системи стабілізації працюють за принципом регуляції положення після відхилення об’єкту від заданого положення. Результатом дослідження стала генерація нового принципу стабілізації на основі класичної системи з додаванням коефіцієнту прогнозування відхилення об’єкта від заданого положення. Для реалізації даного принципу використовується додатковий датчик нерівності поверхні розміщений в передній частині рухомої платформи за допомогою якого можливе описання рівня можливого відхилення системи.

Таким чином можлива генерація керуючого сигналу до моменту реального відхилення системи, що дає перевагу в часі стабілізації положення в порівнянні із класичною системою.

ABSTRACT

Lelyuch Alexander. System of stabilization of arms of stand-alone robot. Qualification master's work. Sumy State University. Sumy, 2022

The work contains 60 sheets, which includes 44 pages of the report, 6 drawings, 32 drawings, 37 formulas. 29 literary sources were used in the execution of the diploma project.

In master's work the object of the research was chosen system of stabilization of arms of the moving platform, the subject of the research became - management of working bodies of the system of stabilization.

The purpose of the work was to analyze the work of the system of arms stabilization mobile work of special purpose, to reveal shortcomings and problems of already existing systems and to improve methods of stabilization of position in space object.

A number of problems were identified in the process of analysis of open sources and projects of existing land-free drons. The main problem of arms stabilization systems is the small speed of the system, which is connected with the large mass of the system of guidance and the imperfect principle of system stabilization. Since the classical stabilization systems operate according to the regulation principle after the object is tilted away from the set position. The research resulted in the generation of a new stabilization principle on the basis of the classical system, adding a factor of prediction of the object's deviation from the set position. To implement this principle, an additional surface roughness sensor is used located in the front of the moving platform by which the possible description of the level of possible deviation of the system is possible.

Thus, it is possible to generate a control signal before the actual deviation of the system, which gives an advantage in the time of stabilization of position in comparison with the classical system.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ 6
ВСТУП 7
1. Аналіз існуючих роботів із системою стабілізації 9
1.1 Аналіз існуючих рішень. 9
1.2 Опис власних контурів керування. 14
1.3 Проблематика дослідження 15
2. Постановка завдання до дослідження. 19
3. Розробка математичної моделі системи керування. 27
3.1 Математична модель електропроводу. 27
3.2 Математична модель редукторної передачі. 32
3.3 Математичний опис навантаження системи. 35
4. Синтез системи керування 38
4.1 Впровадження системи із класичним регулятором. 38
4.2 Структурний параметричний синтез системи керування. 45
Висновок 51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 52
Додаток А 55
Додаток Б 56
Додаток В 57
Додаток Г 58
Додаток Д 59
Додаток Е 60

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АПЗ – апаратно-програмні засоби

СС – система стабілізації

МК – мікроконтролер

ПЗ – програмне забезпечення

ПУ – пристрої управління

МР – мобільний робот

ВП - виконуючий пристрій

ГС – гіроскопічний стабілізатор

АТ – автоматична турель

ДПС – двигун постійного струму

ЧП – черв’ячна передача

ВСТУП

На сьогодні стрімкий розвиток нано-технологій та розвиток технологій у цілому супроводжується впровадженням автоматичних систем в життя людини, частіше з’являються механізми в галузях де раніше не зустрічалися. Так з’явилися роботи офіціанти, менеджери та інші. Також без уваги не залишилась промислова сфера та військова. Великими темпами тяжкий та небезпечний людський труд став замінюватися роботизованими механізмами, що в свою чергу призвело до збільшення продуктивності, збільшенню якості роботи та на сам перед зменшенню нещасних випадків на виробництві. Велика необхідність в автономних інтелектуальних машинах відносилась до галузі військової техніки. Такі механізми давали величезні переваги в виконанні поставлених завдань – це автономність, безпека особистого складу, результативність.

Тому однією з головних завдань мобільних платформ військового призначення є стабілізація, або фіксація озброєння на цілі, для точного ураження та виконання поставленого завдання, або реалізація розвідки. Тому, завдання стабілізації положення на сьогодення є актуальною і не повністю вирішеною темою дослідження.

Завданням дипломного проекту був аналіз роботи модифікованої системи стабілізації положення озброєння автономного робота, виявлення можливих проблем в роботі системи та обґрунтування ефективності даного принципу роботи.

Першочергово необхідно звернутися до різних літературних джерел де описані вже існуючі системи, провести критичний огляд робіт та визначити недоліки. Після аналізу було обрано об’єкт дослідження – система стабілізації положенням, та предметом дослідження – керування робочим органом системи.

Наступним етапом є детальний аналіз контурів регулювання системи. Після аналізу та встановлення основних принципів ставиться за мету виявити можливі проблеми системи та прийняти тактичні рішення для їх нівелювання.

В результаті роботи над генерацією моделі системи та подальшого вирішення можливих проблем необхідно підібрати відповідне апаратне забезпечення для реалізації проекту відповідно до технічного завдання.

За мету проекту ставиться аналіз роботи автоматичної системи стабілізації положення озброєння мобільної платформи. Як результат роботи необхідно вдосконалити існуючу систему керування стабілізацією для збільшення швидкодії наведення, точності та ефективності використання роботів спеціального призначення.

1. Аналіз існуючих роботів із системою стабілізації

1.1 Аналіз існуючих рішень.

Автоматичні мобільні платформи здатні замінити людину в ситуаціях коли необхідно виконувати тяжку, монотонну, або небезпечну роботу. Головним пріоритетом в будь-якій сфері є життя та здоров'я людини. Також використання автоматичних машин повністю виключає людський фактор у виконанні поставленого завдання, так як в небезпечній ситуації людина може втрачати контроль над своїми діями, може допускати нетипові для неї помилки під дією стресу або небезпеки для життя.

Робот — це автоматизовані пристрої, призначені для виконання виробничих та інших завдань, які зазвичай виконують безпосередньо люди. Термін «автомат» в основному використовується для опису автоматичного пристрою, поведінка якого зовні не нагадує поведінку людини. Здебільшого сучасні промислові роботи – це «руки», маніпулятори, встановлені на основі, призначені для виконання монотонних завдань, таких як складання, переміщення тощо. Роботи також включають мобільні пристрої з дистанційним керуванням, які працюють у небезпечних для людини середовищах. Прикладами можуть бути глибока вода, роботи, що працюють у космосі, пристрої військового призначення (розвідка, розмінування, доставка боєприпасів тощо). Залежно від середовища, в якому вони працюють, роботи класифікуються на наступні типи:

- Повітряні роботи, також відомі як безпілотні літальні апарати або дрони.
- Наземні або домашні роботи або безпілотні наземні транспортні засоби.
- Підводні роботи, або автономні підводні апарати.
- Полярні роботи, призначені для пересування крижаними та нерівними місцевостями.

- Роботи-доставники, призначені для переміщення матеріалів і припасів у розміченому робочому середовищі.

Роботів також можна розділити на дві групи відповідно до їх мобільності. Речі, які можуть рухатися в навколишньому середовищі (такі як дрони, роботизовані візки, зонди), і речі, які міцно закріплені в навколишньому середовищі (такі як роботизовані руки для зварювання металу). Незалежність робота від провідного живлення робить робота автономним і керованим. Автономні типи діють незалежно, без керівництва людини, тоді як керовані типи потребують зовнішніх команд у процесі виконання завдань. Роботи поділяються на макророботів (роботів, видимих неозброєним оком), мікророботів (розміром мікробів) і нанороботів (розмір молекули/атома).

Функціональність робота та його основна конструкція залежить від умов експлуатації, характеру роботи та робочого середовища робота. В цілому можна поділити робочі середовища на два типи, перший тип – це середовища с організованою структурою (детерміновані) та із невизначеною організацією (недетерміновані).

До першого типу середовищ відносять робочий простір в якому чітко визначені положення всіх об’єктів та робочої зони робота. Прикладом таких середовищ можуть бути склади із продукцією, де місця для полиць чітко визначенні, та робот має план приміщення з розміщеними в ньому всіх об’єктів, за таким принципом працюють роботи-вантажники в компанії Amazon. Також можливі середовища частково детерміновані, де частина простору організована в межах робочого поля робота, а частину цього простору неможливо визначити. Так наприклад працюють платформу в цехах де є рейкова колія по якій рухається автоматизована платформа із встановленим на ній інструменті. Так детермінованим є простір навколо колії в межах робочої зони інструмента, вся інша частина простору є невизначеною для робота та може динамічно змінюватися при цьому не заважати роботі виконуючого механізму робота.

До невизначених середовищ або недетермінованих, відноситься простір в якому неможливо визначити постійне положення об’єктів або цього не потребує

характер завдання для функціонування робота. В цьому випадку Прикладами роботизована платформа має необхідне апаратне забезпечення та функції системи для орієнтації у робочому середовищі. Тому ці системи мають більшу собівартість, складність та універсальність. таких середовищ може стати вулиця по якій рухається робот кур'єр, безпілотні літальні апарати та повітряний простір або пошуковий робот який займається знаходженням людей під завалами. Визначивши базові типи середовищ та опираючись на тему завдання можна зробити висновки що бойова роботизована платформа з бойовим модулем призначена для роботи в детермінованому середовищі із невизначеними в ній положеннями об’єктів.

Розглянемо одну із провідних організацій у автоматизації – це General Dynamics [1]. Компанія була заснована в 1952 році, від тих пір головним пріоритетом є аерокосмічна та військова галузь. В 2021 році General Dynamic в рамках оборонної виставки “AUSA 2021” презентувала сімейство бойових роботів. Головна особливість цих машин – здатність самостійно прокладати маршрут і вражати цілі противника без втручання операторів роботизованих систем.

Рисунок 1.1 – роботизована платформа компанії General Dynamic

З (Рис. 1.1) видно що дана техніка має повномасштабні розміри сучасного танку, та оснащена інтелектуальним управлінням без втручання людини.

Рисунок 1.2 – бойовий робот MUTT

Також ця компанія спільно з лабораторією Корпусу морської піхоти в Кемп-Пендлтон в 2016 році проводила випробування гусеничного робота MUTT (багатоцільового тактичного транспорта) (Рис 1.2) в умовах наближених до реальних [2]. Даний робот призначений для надання вогневої підтримки піхоти, для підвезення вантажу та евакуації поранених. На роботі встановлений кулемет M134 Minigun на двох осевій башті із системою стабілізації.

Також одним із яскравих прикладів системи стабілізації озброєння є бойова роботизована платформа RoBattle LR-3 ізраїльської компанії IAI. Робот вперше був представлений в 2016 році в рамках виставки Eurosatory 2016. LR-3 призначений для введення активних бойових дій, розвідки, засідок та патрулювання периметру. Він має колісну платформу з дизельною силовою конструкцією, з можливістю модернізації на гусеничну основу для підвищення мобільності на бездоріжжі.

Найбільш чутливі зони RoBattle прикриті. Робот озброєний надлегким бойовим модулем з дистанційним управлінням Pitbull, розроблений компанією General Robotics. Pitbull важить 50 кг і включає в себе набір сенсорів, що дозволяють вести вогонь вдень, вночі і в умовах обмеженої видимості, забезпечуючи базову платформу високими можливостями ситуаційної обізнаності, що дозволяє роботу ефективно реагувати протягом декількох секунд на загрози, що виникають навколо нього, маневруючи, приймаючи контрзаходи або подавляючи вогонь.

Що стосується вітчизняних розробок в сфері роботизації, в 2017 році Запорізькою компанією було запропоновано створити концептуальну машину наземного базування на базі колісного квадроциклу, таким стала бойова роботизована платформа «Ласка» [3] (Рис. 1.3).

Рисунок 1.3 – самохідна платформа «Ласка»

«Ласка» має 4-х колісну базу з електроквадроцикла та систему автоматичної стрільби на основі турелі з установленою на ній ПКМ. Слід зауважити, що дана модель не має системи стабілізації і не спроможна вести точну стрільбу під час руху. Систем обладнана розпізнаванням об’єктів та рекомендована застосовуватися у складі механізованих або мотопіхотних частин збройних сил України.

Одним із цікавих екземплярів українського виробництва став бойовий наземний дрон РСВК-М, також відомий відомий під назвою "Мисливець", від КБ "Robotics" [4]. Цей дрон вже декілька років успішно тестується у підрозділах Збройних Сил України та виконує бойові завдання у зоні ООС. Дана бойова одиниця представляє собою роботизований модульний комплекс який складається з турелі та рухомої платформи. Ці дві складові можуть працювати окрема одна від одної що дозволяє використовувати платформу як тягач для перевезення вантажів або евакуації поранених з поля бою. Платформа вагою 600 кілограм з колісною формою 6х6 та з електродвигуном постійного струму загальною потужністю 6кВт спроможна проїжджати від 10 км по пересіченій місцевості із навантаження. Батарея даного комплексу складає 13.6 кВт/год, чого достатньо для виконання поставлених завдань.

Рисунок 1.4 – роботизований комплекс «Мисливець»

На (Рис. 1.4) зображено платформу під час виконання бойового завдання із доставлення корисного навантаження до віддаленого місця дислокації бійців. Також використовуючи малюнок ми можемо проаналізувати технічне компонування платформи. Бачимо що комплекс має спеціальну стійку на якій встановлюється спеціальне обладнання, камери. Однією із головних особливостей системи та причиною актуальності впровадження системи стабілізації є відсутність амортизаційної підвіски рухомої платформи, що дуже сильно ускладнює стрільбу під час руху, а головною перевагою такої конструкції є стійкість системи до ушкоджень, так як конструкція має мінімум рухомих частин.

1.2 Опис власних контурів керування.

Проект ставить за мету розробити систему позбавлену проблем сучасних, вже існуючих рішень автономних рухомих платформ із озброєнням. Основним елементом будь-якої системи стабілізації є інерційні давачі, такі як гіроскоп та акселерометр. Розглянемо більш простіші системи стабілізації які широко використовуються в повсякденному житті, це гіростабілізатори для камер. За принципом стабілізації гіростабілізатори можна розділити:

• на гіростабілізатори безпосереднього типу, які стабілізуються безпосередньо гіроскопом. Такі ГС, як правило, одновісні та представляють

собою, по-суті, звичайний триступеневий гіроскоп з великим кінетичним моментом.

• на гіростабілізатори силового типу, в яких стабілізація здійснюється гіроскопом разом із стабілізуючим двигуном. Чутливим елементом силового ГС є двоступеневий гіроскоп.

• на гіростабілізатори індикаторно-силового типу, у яких стабілізація здійснюється в основному стабілізуючим двигуном. Чутливим елементом індикаторно-силового ГС може бути поплавцевий інтегруючий гіроскоп, датчик кутової швидкості або інтегро-диференційний (форсуючий) гіроскоп.

• на гіростабілізатори індикаторного типу, у яких стабілізація здійснюється стабілізуючим двигуном, а гіроскоп є лише вимірником (індикатором) відхилення платформи від необхідного становища. Чутливим елементом індикаторного ГС є триступеневий гіроскоп або гіроскоп, що динамічно налаштовується.

1.3 Проблематика дослідження

Основною проблемою можна вважати час реакції системи на збурення, цей час є комплексним і складається із часу який потрібен для встановлення різниці заданого положення та фактичного, це залежить від маси бойової частини, від технічних характеристик системи наведення, потужності двигунів, швидкості руху автоматизованої платформи, характеристик ґрунту по якій рухається робот, від пружності колес та багатьох інших факторів. В загальному випадку всі ці параметри можна спросити до характеристики технічної інерційності системи, більш легкі механізми швидше реагують на вхідні збурення через меншу кінетичну складову, а більш масивним механізмам потрібно більше часу. Також не виключаються втрати часу на оброблення значень для сенсорів положення (акселерометр, гіроскоп, магнітометр) та час який витрачається на оброблення даних їх передачу та зберігання. Навіть після встановлення фактичної різниці кутових положень від заданої величини, після отримання всіх даних з давачів та перетворення їх у оптимальні для виміру значення, мікроконтролеру (МК) який керую системою стабілізації необхідний час для генерації відповідного керуючого сигналу до завдання, де цей час буде

описуватися параметром перехідного процесу систему. Не виключається із цього комплексного рівняння і якість регулятора який необхідний для вирішення критерію та швидкодії, саме якість цього елементу буде визначати левову долі швидкодії всієї системи.

Розглянемо принцип роботи даної системи з використанням додаткового давача.

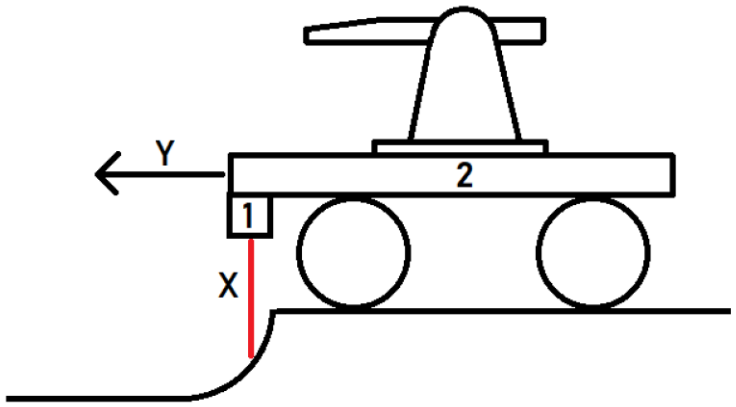


Рисунок 1.5 – Схематичне відображення роботи системи

На (Рис.1.5) роз’яснюється базовий принцип роботи системи, можемо бачити два основні елементи: (1) – це лазерний датчик відстані, (2) – це рухома платформа з колісною базою. В схеми присутні дві базові величини які необхідні для дослідження нового коефіцієнту впливу на систему керування, перша величина це швидкість (Y) з якою рухається платформа, та друга величина – це відстань (X) від давача до ґрунту. Також можна визначити додаткові другорядні величини які можуть бути присутні у подальшому матиматичному розрахунку системи – це радіус колеса, за допомогою якого можна створити графік траєкторії руху платформи, іншою такою величиною може бути тип ґрунту по якій рухається платформа.

Сенс даного принципу полягає у підрахунку залежності глибини перешкоди від швидкості руху платформи, діаметру колеса тим самим стає можливим ввести новий коефіцієнт прогнозування відхилення системи та пришвидшити швидкодію системи так як давач розміщений в передній частині робота.

Якщо спроектувати принцип даного керування стабілізації роботизованої платформи на людину, то під час руху людина покладається на зір, відчуття простору, тактильні відчуття, тим самим максимально ефективно може тримати баланс. Класичні методи стабілізації полягають лише на орієнтацію сенсорів відчуття просторів і ніяк не описують навколишній стан середовища в якій перебуває об’єкт керування, знову повертаючись до людини, то це стабілізація із закритими очима, лише орієнтуючись на тактильні сенсори.

Для подальшого дослідження спростимо систему відкинувши рухому автоматичну платформу, її вплив на систему буде описуватися математичною формулою і в загальному випадку буде визначати інерційність системи стабілізації. Надалі залишену частину системи яка виконує лише функції наведення озброєння та його стабілізації будемо називати автоматичною туреллю (АТ).

Залишивши лише механізм наведення, можемо розкласти його на елементарні складові, та скласти структурну схему системи.

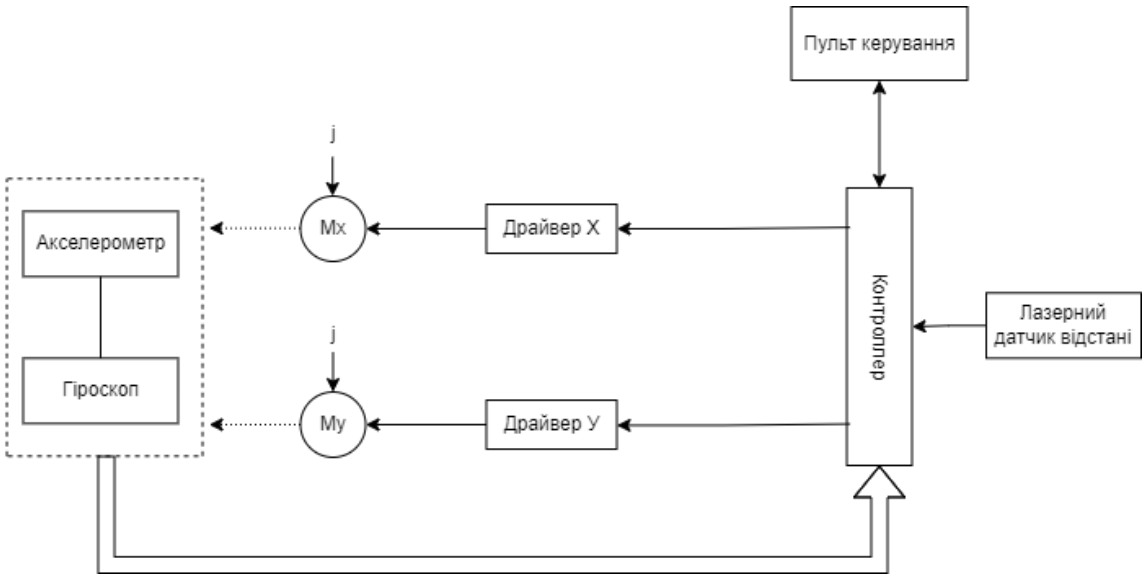


Рисунок 1.6 – Структурна схема системи стабілізації

Головною відмінністю даної структури (Рис. 1.6) є додатковий блок, який має назву лазерний датчик відстані. Інша частина структури не відрізняється від класичний принципів керування стабілізацією.

Турель (від французького Tourelles — «вежа») — пристрій, який використовується для кріплення гармати, гранатомета чи кулемета.

Зазвичай забезпечує можливість горизонтального та вертикального переміщення зброї, а в деяких моделях допускає круговий вогонь. Вперше використаний у військових цілях 1910 р. За принципом управління його можна розділити на три типи: ручне керування, дистанційне керування та автоматичне керування.

Ручне керування - стрілець знаходиться близько до зброї і рукою крутить маховик, щоб прицілитися. Ручне наведення наражає солдата на ризик, оскільки турель не завжди знаходиться в укритті, здатному захистити її від вогню противника.

Принцип дистанційного керування полягає в тому, що турель має електропривод, який переміщує зброю. Зазвичай він керується за допомогою пульта дистанційного керування. Він може бути підключений до машини як провідним, так і бездротовим способом. У кожного варіанта під'єднання є свої сильні та слабкі сторони.

Недоліки провідного підключення:

- Провід може бути пошкоджений противниками, що призведе до втрати управління.

- Збільшеню часу встановлення турелів.

Переваги провідного підключення:

- Захист від засобів радіоелектронної боротьби противника;

- Високоякісна передача даних.

Недоліки бездротового керування:

- Вразливість до техніки РЕБ.

- Можлива втрата керуючого сигналу.

Переваги бездротового керування:

- скорочено час розгортання вогневих позицій;

- Більш зручне керування.

- Висока віддаленість оператора від небезпечної позиції.

Принцип автоматичного керування полягає в тому, що турель здатна сама розпізнавати ворожу техніку та піхоту, й за потреби вести по ним вогонь.

2. Постановка завдання до дослідження.

Опираючись на отриманий досвід під час пошуку та аналізу існуючих бойових машин можна визначити основні недоліки систем стабілізації:

- Час реакції системи.
- Перерегулювання системи.
- Інерційність системи.
- Точність системи.
- Велика вартість.
- Потужність ПО.

До часу реакції системи відноситься мінімальний час який витрачається на встановлення стабільного положення, найчастіше це показний який визначається за рахунок руху механізмів із одного крайнього положення в інше. При цьому має бути максимальна швидкість руху системи. Визначається час реакції з нульового моменту часу до повного встановлення заданої величини.

Небажаною складовою процесу стабілізації є перерегулювання системи, так як негативно впливає на якість всієї системи та виконуючих механізмів. Найчастіше в системі стабілізації використовуються електродвигуни, струм який вживають ці механізми залежить від сили навантаження на валу двигуна. Якщо в системі стабілізації наявний процес перерегулювання то електродвигун в момент перевищення заданої величина положення, має увімкнути зворотній напрямок свого руху для повернення показів в задану величину, підкреслюючи те що система має стабілізувати військове озброєння, можливо навіть під час стрільби, то такі системи матимуть велику інерційність. То на валу двигуна в момент зворотного увімкнення обертання буде знаходитися збільшений момент, який необхідно буде невілювати

потужністю двигуна. В такому випадку явище перерегулювання негативно відобразиться на терміні експлуатації виконуючих механізмів.

Інерційність системи, це невід'ємний параметр будь-якої системи. Саме ця складова описую кінетичну та потенційну ємність. Для систем стабілізації цей параметр відіграє важливу, та нажаль негативну роль. У військовій сфері стрілецькі модулі можуть мати вагу до 500 кг, для таких систем потрібні потужні двигуни, масивні механізми та велико вартісні елементи, що негативна впливає на строк роботи такої системи, ремонтопридатності, та дешевизни. Сучасні технології та відкриття в сфері матеріалознавства роблять можливим часткове усунення даної проблеми, але це єдиний на сьогодні варіант вирішення цієї проблеми.

До точності системи відноситься насамперед якість дискретизації датчиків і якість боротьби із помилками та шумом. Чутливі датчики положення мають високу дискретизацію але окрім цього мають високу вимогу до шумозахисту датчика та вискоку ціну. Датчики з меншою чутливістю мають більшу стійкість до завад. Необхідно підібрати оптимальний варіант опираючись на особливості системи.

Велика вартість грає не останню роль в кількісній статистиці систем стабілізації. Більшість організацій та країн які виготовляють бойові комплекси с системами стабілізації або автоматичного наведення, мають обмежений парк таких механізмів та найчастіше комбінують їх с механізмами ручного наведення. Так як велика собівартість створення систем, та подальше гарантійне обслуговування в декілька разів перевищую ті ж самі процедури але для ручних систем наведення. Часто комбінують ручне та автоматичне наведення, через велику вірогідність виходу автоматичної системи із ладу резервують аварійні механізми ведення стрільби.

Для якісної стабілізаційної системи необхідно відповідне потужне програмне та апаратне забезпечення. Так як, процес стабілізації вимагає одночасного вирішення низки питань, опитування давачів, постійного генеруванню керуючого сигналу, вимоги до продуктивності мікропроцесора дуже жорсткі. Від потужності обчислювальної системи залежить ефективність системи в цілому. Необхідно

підібрати контролер який матиме мінімально необхідний функціонал та ще залишався запас по продуктивності системи.

Більшість готових комплексів вирішила проблеми інерційності системи слідкування за цілю, одним з таких варіантів є система керування яка влаштована за перископічним принципом із використанням системи дзеркал [5, p.42]. В такій системі немає необхідності встановлювати важкі прилади слідкування на вісь яка стабілізується.

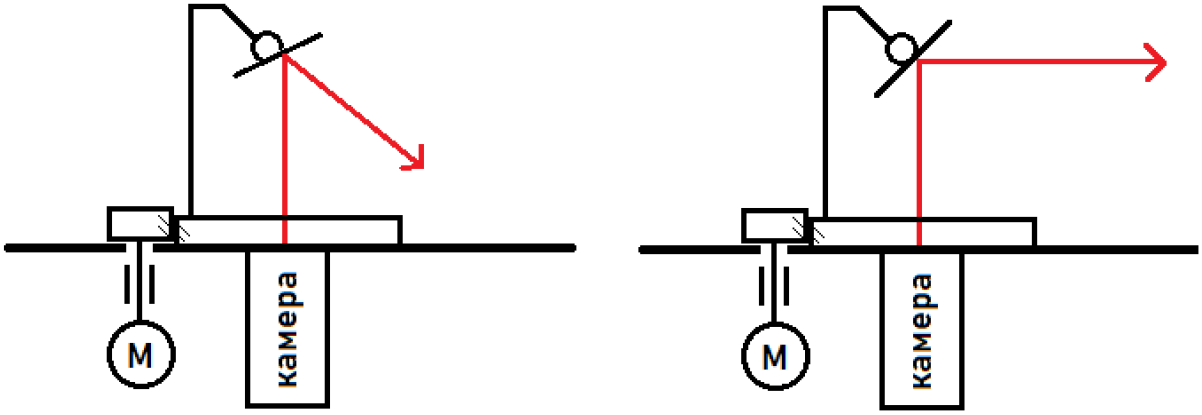


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення системи

На (Рис. 2.1) наведений принцип роботи оптичної системи слідкування за об’єктом.

Прилади вбудовуються статично в корпус машини, та за допомогою дзеркал проектується зображення цілі в об’єктив приладу. В такій компоновці можливо досягти зменшення інерційності та маси стабілізуючого об’єкту і тим самим збільшити швидкодію системи. Також однією з переваг даної системи є зменшення відсотку виведення з ладу дорогого обладнання за рахунок того що прилади знаходять в середині корпусу машини. Але такий принцип стабілізації не можливо застосувати для стрілецької зброї у зв’язку із фізичними особливостями оптичних приладів та зброї.

Щодо методів вирішення проблеми перерегулювання, то цей принцип зводиться до процесу налагоджування регулятора системи стабілізації за рахунок

підбору необхідних коефіцієнтів. Одним з таких методів є емпіричний принцип налаштування регулятора за методом Циглера-Нікольсона.

Для даного метода використовується експериментально отримані дані реальних об'єктах. Емпіричний метод налаштування регулятора не вимагає знання про побудову математичної моделі об’єкта. Проте передбачається, що систему реалізовано та можлива зміна параметрів регулятора. Переважають два методи налаштування:

- Метод незагасаючих коливань.

- Метод загасаючих коливань.

Метод незагасаючих коливань полягає в тому, що у працюючій системі вимикаються інтегральні та диференційні складові регулятора, тобто система працює за принципом прямо пропорційного керування. Далі в системі відбувається підбір коефіцієнту П зі збільшенням його значення, то тих пір поки в системі не виникнуть незатухаючі гармонічні коливання з певним періодом. На даному етапі система буда виведена на межу стійкості. Під час даного процесу фіксуються значення критичного коефіцієнту підсилення регулятора і період критичних коливань системи. Також головною умовою є те, що під час критичних коливань жодний параметр системи не повинен виходити на рівень обмеження.

За значеннями періода коливання (Tp) і П-коефіцієнту (Kkp) розраховуються параметри налаштування регулятора:

П-регулятор: Kp = 0,55Kkp.

ПІ-регулятор: Kp = 0,45Kkp, Ti = Tp*1.2 /Tp .

ПІД-регулятор: Kp = 0,6Kkp, Ti = 2*Tkp / Tp, Td = Tk*Tp / 8.

Цей метод можна застосовувати в випадках коли амплітуда критичних коливань системи не перевищує аварійного показника в інших ситуаціях використання даного метода не є бажаним та може призвести до виведення системи з ладу або до аварійної ситуації.

Наступний метод дозволяє настроювати регулятор без виведення системи в критичні коливання, що є припустимим для більшості систем керування. Як і в

попередньому методі для початку процесу налаштування вимикаються інтегральні та диференційні складові регулятора при залишені прямо пропорційного принципу регулювання. Шляхом збільшення П-коефіцієнту досягається перехідний процес реакції на прямокутний імпульс за сигналом завдання або за збуренням з декрементом загасання D = 1 / 4.

Далі визначають період цих коливань Tk і значення постійних інтегрування та диференціювання регуляторів Ti , Td :

ПІ-регулятора: Ti = Tk / 6 .

ПІД-регулятора: Ti = Tk / 6 , Td = Tk /1,5.

Після знаходження відповідних коефіцієнтів необхідно додатково перевірити значення прямо пропорційного коефіцієнту із встановленням інтегрального та диференційного коефіцієнту. Зазвичай додаткове налаштовування коефіцієнту призводить до його зменшення на 20-30% від початкового показника.

Що стосується вибору чутливості давачів, то питання підбору залежить від поставлених завдань до системи автоматизації, експлуатаційного середовища та вартості. Обирати необхідно із запасом по дискретності в 10 – 30 % від поставленого завдання з використанням гарного апаратного або програмного фільтру. Інколи вибір більш дешевих датчиків переважає загальні плюси від вибору дорогих приладів, спираюсь на технічне завдання системи.

Розібравшись з основною проблематикою систем та методами їх вирішення можна перейти до формулювання критерію до системи регулювання. Для цього опишімо технічні особливості досліджуваної системи.

Умовно систему можна на дві окремі частини, а саме:

- Механізм стабілізації.
- Блок пульта керування.

Механізм стабілізації включає в себе:

1) Тяговий електромагніт для електро-спуску.
2) Плата для комутації тягового електромагніту.
3) ДПС для горизонтального переміщення;

4) Драйвер для керування ДПС для горизонтального переміщення;
5) ДПС для вертикального переміщення;
6) Драйвер для керування ДПС вертикального переміщення;
7) Кінцевий вимикач крайнього правого положення;
8) Кінцевий вимикач для крайнього лівого положення;
9) Кінцевий вимикач для крайнього верхнього положення;
10) Кінцевий вимикач для крайнього нижнього положення;
11) Основна плата з мікроконтролером.
12) Трьох-осьовий датчик положення у просторі.

Також до основного блоку можна віднести акумулятор для живлення турелі, перетворювач напруги для живлення керуючої плати.

До блоку пульта керування відносяться:

1) Джойстик для керування туреллю;
2) Кнопка для здійснення пострілу;
3) Запобіжник, який розриває керуючий сигнал для спрацювання тягового електромагніту;
4) Перемикач для зміни режимів стрільби;
5) Світлодіоди для індикації режимів стрільби та індикації при спрацювання кінцевих вимикачів;
6) Основна плата з контролером.

Додатково до блоку керування відносяться: вольтметр, який показує напругу на акумуляторі, перетворювач напруги для живлення керуючої плати,

перетворювач напруги для живлення монітору, на який виводиться зображення з тепловізійного прицілу.

Для спілкування між двома блоками потрібно обрати інтерфейс. Було обрано інтерфейс RS-485, за допомогою пульта керування задається необхідний градус утримання кулемету, також можливе ручне наведення без використання стабілізуючої програми.

«RS-485 – один з найбільш поширених стандартів фізичного рівня асинхронного зв’язку. Використовується для обміну даними між декількома пристроями по одній двох провідній лінії зв’язку (витій парі) в напівдуплексному режимі. Передача виконується одночасно тільки в одну сторону. Прийом даних при цьому неможливий. Для прийому даних потрібно перемикання приймача в режим прийому. Відстань роботи цього інтрефейсу може сягати до 1200 метрів.

Маса бойового модуля із повним боекомплектом складаю 17 кг, також необхідно враховувати масу виконуючих механізмів та конструкцію рухомої частини. Приблизна загальна маса механізму стабілізації не перевищую 25 кг, для досліджуваного об'єкту. Також необхідно зарезервувати потужність системи наведення для варіативності встановлення різних видів кулеметів через різницю у вазі зброї. Тому система стабілізації повина без перевищення номінальних електричних та механичних параметрів системи стабілізувати корисне навантаження масою до 35 кг. З цього розрахунку будуть обиратися виконуючі механізми та конструктив системи.

Використання системи можливе обмеженому просторі, та на вуличній місцевості, тому необхідно конструктивно досягти оптимальних кутів нахилу та повороту системи.

Обертання зброї має відбуватися на 360 градусів для введення стрільби з будь-якого положення рухомої платформи, що покращить ефективність використання системи. Також необхідно враховувати той момет що, дроти керування та живлення приладів системи які вбудовані в вертикальну вісь під час обертів башні навколо своєї осі будуть мати властивості перекручуватися, тому для системи необхідно ввести координати повороту башні за допомогою енкодерів або іншої системи позіціонування. Так оператор має отримувати інформацію про кут повороту озброєння від початково курсового положення, та за необхідності повернути механізми в початкове положення для запобігання виведення системи з ладу.

Вертикальні кути нахилу мають забезпечувати введеня стрільби в умовах близьких до вуличних боїв, тобко коли ціль знаходиться на досить великому рівні

відносно горизонту, це можуть бути верхні єтажі будівель та вишок. Також при несприятливих рельєфних ситуаціях можлива потреба вести вогонь нижче рівня горизовну. Тому для вертикальних кутів нахили необхідно досягти наступних значень:

- Кут нахилу вниз має бути не більшим ніж – 30% відносно горизонту.

- Кут нахилу вгору має бути не меньшим ніж +45% відносно горизонту.

Для оптимального виконання завдань недобхідно досягнути наступних параметрів швидкості:

- Для горизонтального руху, 15 – 20 град. / сек.

- Для вертикального руху, 8 – 12 град. / сек.

При таких параметрах повний поворот кулемета відносно рухомої платформи буде відбуватися за 18 секунд. Для вертикального рухе цей час буде становити 5 секунд від мінімального положення до піднятого на максимальний кут кулемета. Таким чином вимоги до швидкодії системи стабілізації не можуть бути перевищувати параметрів максимальної швидкості руху механізму наведення.

Для синтезу необхідного розрахункового часу реакції системи необхідно підрахувати час який необхідний для передачі данних від давачів, час необхідний виконуючим механізмам для зміни положення. Дискретность давачів положення середньої ланки точності складає 0.01 градус. За одну секунду можлива зміна на 20 грудсів по горизонталі та 12 градусів по вертикалі, або 0,02 град. / мсек та 0.012 град./ мсек. відповідно. З теореми Котельнікова час дискретизації системи візмемо не меньше ніж в 7 раз швидке, система за рахуно вираховуючих потужностей здатна збільшити дискретизацію в 20 разів. Тобто час опитування давачів буде становити приблизно 3 кГц, чого буде достатньо для виконання поставленної задачі.

Похибка системи має бути не більшою ніж 0.2 градуси від заданої величина. Дана величина була підібрана в результаті аналізу статичної похибки трьохосьового датчика положення , яка становила 0.1 градус, та аналізу механічної структури системи наведення.

3. Розробка математичної моделі системи керування.

3.1 Математична модель електропроводу.

Для подальшого дослідження необхідно математично описати систему для відображення суттєвих особливостей в середовищі моделювання Matlab.

Для початку опишемо математичну модель двигуна постійного струму. Двигун постійного струму – це будь-який клас обертових електричних машин, які перетворюють постійний струм електричної енергії на механічну енергію. Найбільш поширений тип заснований на силі, що створюється магнітним полем. Майже всі типи двигунів постійного струму мають внутрішній механізм, електромеханічний або електронний для періодичної зміни напрямку струму в будь-якій частині двигуна. Двигуни постійного струму були першим типом, що широко використовується, оскільки вони могли харчуватися від існуючих систем розподілу освітлення з живленням від постійного струму. Швидкість двигуна постійного струму можна регулювати в широкому діапазоні, використовуючи змінну напругу живлення або змінюючи струм в обмотках збудження. Невеликі двигуни постійного струму використовуються в інструментах, іграшках та побутовій техніці. Двигуни загального призначення працюють на постійному струмі, але є легкі двигуни, що використовуються в переносних електроінструментах та приладах. Великі двигуни постійного струму використовуються для руху електромобілів, ліфтів, лебідок або сталеливарних заводів. Поява силової електроніки уможливила заміну двигунів постійного струму двигунами змінного струму в багатьох додатках.

Схема найпростішого колекторного електродвигуна постійного струму з 2-х полюсним статором та 2-х полюсним ротором зображена на (Рис 3.1).

Проектування двигуна постійного струму таке саме, як проектування генератора постійного струму. У електродвигунах електромагнітний момент

створюється з допомогою явища електромагнітної індукції при взаємодії струму в обмотках ротора

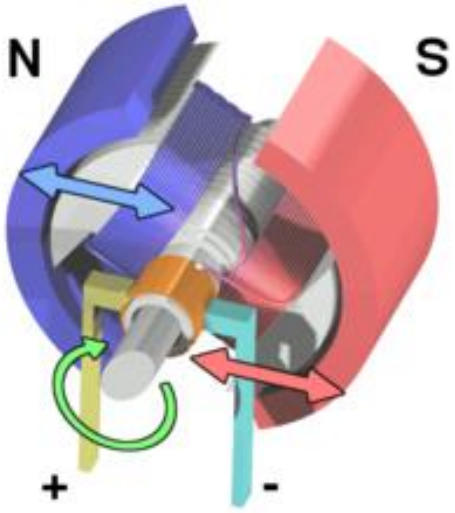


Рисунок 3.1 – Будова двигуна постійного струму

(якоря) з основним магнітним полем. Розрізняють ДПС із незалежним збудженням та ДПС із залежним збудженням. Електродвигуни постійного струму мають вихідну потужність від часток вата до тисяч кіловат з ефективністю від 0,02 - 0,03 до 0,93. Електродвигуни постійного струму використовують додатковий електричний опір для зміни струму ланцюга ротора, зміни напруги живлення і зміни магнітного потоку за допомогою реостата, що дозволяє плавно і в широких межах регулювати частоту обертання.

Вихідною величиною в випадку регулювання ДПС буде частота обертання ω, регульована зміною напруги U, що підводиться до ланцюга якоря двигуна. Тому необхідно встановити залежність ω=f(u) в динаміці. Напишемо рівняння електричного балансу для ланцюга якоря двигуна. Зверніть увагу, що у моторному режимі напруга живлення розраховується за формулою:

$$u = L_я \frac{di_я}{dt} + R_я i_я + e, \qquad (3.1)$$

де Lя, Rя- індуктивність і активний опір кола якоря;

е - проти-ЕРС (електрорушійна сила) двигуна.

Для режиму розгону двигуна можна записати рівняння динаміки у вигляді:

$$M_{дин} = M_{дв} - M_{ст}, \tag{3.2}$$

Де Мдин, Мдв, Мст- відповідно динамічний, двигунів і статичний моменти двигуна. Коли статичний момент невеликий, тобто Мст близький до 0, то можна записати

$$J\frac{d\omega}{dt} = ci_{я}, \tag{3.3}$$

звідки

$$i_{я} = \frac{J}{c}\frac{d\omega}{dt}, \tag{3.4}$$

де J - момент інерції двигуна;

с - стала струму.

Підставимо знайдене значення $i_{я}$ в рівняння електричної рівноваги кола якоря двигуна, після деяких перетворень дістанемо

$$\frac{R_{я}L_{я}J}{R_{я}c}\frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_{я}J}{c}\frac{d\omega}{dt} + c_e\omega = u \tag{3.5}$$

Введемо позначення обравши середні параметри ДПС:

$$T_{я} = \frac{0{,}028}{0{,}28} = 0{,}1\text{с}. \tag{3.6}$$

Коефіцієнт двигуна $k_{\text{д}}$ визначимо за паспортними даними для номінального режиму у статиці:

$$c_e\omega = u - i_я R_я \tag{3.7}$$

Звідки

$$c_e = \frac{u - i_я R_я}{\omega} \tag{3.8}$$

$$k_Д = \frac{1}{c_e} = \frac{1}{\frac{u - i_я R_я}{\omega}} = \frac{\omega}{u - i_я R_я} = \frac{\omega}{U_{ян} - I_{ян} R_я} = \frac{314}{186 - 43 \cdot 0{,}28} = \frac{314}{173{,}96} = 1{,}805 \frac{рад}{В \cdot с}. \tag{3.9}$$

Перетворимо задане рівняння в операторну форму:

$$(T_я T_М p^2 + T_М p + 1)\omega = k_Д u. \tag{3.10}$$

Та остаточно передатна функція двигуна буде

$$W(p) = \frac{k_Д}{T_я T_М p^2 + T_я p + 1} \tag{3.11}$$

Якщо

$$T_М = \frac{R_я J}{c c_e} > 2T_Я = 2\sqrt{\frac{L_я J}{c c_e}}, \tag{3.12}$$

Або

$$R_я \sqrt{\frac{J}{c c_e}} > 2\sqrt{L_я} \tag{3.13}$$

то двигун при даному співвідношенні параметрів буде аперіодичною ланкою другого порядку, а в протилежному випадку – коливальною ланкою.

Визначимо коефіцієнт $T_м$:

$$T_M = \frac{JR_я}{k^2}, \text{ де } k = \frac{1}{k_д}, \tag{3.14}$$

Тоді

$$T_M = JR_я k_Д^2 = 0{,}28 \cdot 0{,}28 \cdot 3{,}258 = 0{,}255 \tag{3.15}$$

Таким чином $T_м$=0,255 > 2*$T_я$=0,2, тобто двигун є аперіодичною ланкою другого порядку. Тоді передатна функція буде набувати наступного вигляду:

$$W(p) = \frac{1.8}{0.255*0.1*p^2 + 0.1p+1} \tag{3.16}$$

$$W(p) = \frac{1.8}{0.0255p^2 + 0.1p+1} \tag{3.17}$$

Створимо передаточну функцію в середовищі Matlab, яка матиме вигляд який представлений на (Рис. 3.2).

$$\frac{1.8}{0.0255s^2 + 0.1s + 1}$$

Рисунок 3.2 – Передатна функція

3.2 Математична модель редукторної передачі.

Далі розглянемо наступних блок системи, це передаточна функція механізмів електроприводів, а саме редукторні передачі. Що стосується визначення, то черв'ячна (шнекова) передача — зубчаста передача, що призначена для передавання обертового руху між валами, осі яких мимобіжні в просторі і утворюють прямий кут. Поперечні вали можуть мати будь-який кут між собою, але найчастіше використовуються ортогональні вали з кутом 90°. Залежно від форми черв'яка шестерня може бути циліндричною або кулястою для більш високої вантажопідйомності та ефективності. Однак вони складніші у виготовленні та встановленні. За масою та габаритними розмірами черв'ячні редуктори знаходяться на рівні двоступінчастих циліндричних редукторів, але мають у 2,5-5 разів більші втрати на тертя. Це створює значну кількість тепла та вимагає застосування спеціального обладнання для відведення тепла (ребер корпусу, нагнітачів тощо). Також редуктори черв'ячні піддаються високим осьовим навантаженням, що вимагає застосування спеціальних підшипників, таких як радіально-упорні підшипники.

Рис 3.3 – Приклад будови черв’ячної передачі

Конструктивно ЧП складається з гвинтового черв'яка та зубчастого черв'ячного колеса з увігнутими косими зубами, що представлено на (Рис. 3.3). Передача обертального руху здійснюється за принципом гвинтових пар, де гвинт - черв'як, а гайка - віялоподібне колесо, вирізане з довгої гайки.

Найчастіше тяга черв'ячна, а передача працює за рахунок зменшення обертання веденого валу, але можлива передача обертального руху від черв'яного колеса. У зачепленні обертання черв'яка та контакт зубів черв'ячного колеса відбуваються вздовж лінії (на відміну від косозубих передач, які мають точковий контакт зубів), і відбувається більше прослизання. Тому черв'ячні передачі застосовують для передачі малої та середньої потужності (до 50 кВт) через значні втрати в зачепленні, хоча існують і передачі, здатні передавати потужність до 200 кВт. За допомогою черв'ячних передач можна реалізувати великі передавальні числа u = 7 ... 100 і більше. Такі передачі, як кінематичні, і силові, застосовуються в підйомно-транспортних машинах, різних металообробних верстатах, автомобілях тощо.

Для опису математичної моделі необхідно проаналізувати вплив редуктора на систему. В ідеальному випадку, редуктор представляє собою відношення вихідної швидкості обертання валу до вхідної швидкості, і у спрощеному вигляді записується як статичний коефіцієнт.

Тобто можна записати наступний вираз:

$$\alpha_H(t) = \frac{1}{i}\alpha_\partial(t) \tag{3.18}$$

Застосуємо перетворення Лапласа і отримаємо наступний вираз:

$$\alpha_H(p) = \frac{1}{i}\alpha_\partial(p) \tag{3.19}$$

Знайдемо передаточну функцію ланки:

$$W_{ред}(p) = \frac{\alpha_H(p)}{\alpha_\partial(p)} = \frac{1}{i} \tag{3.20}$$

Даний вираз відповідає передаточній функції безінерційної ланки, але із емпіричного досліду можна зауважити, що ЧП за своєю механічною будовою має відчутний люфт у системі електроприводу, тому необхідно замінити вираз який

описаний вище аперіодичною ланкою першого порядку, для більш точного опису моді системи стабілізації.

Така ланка описується диференційним рівнянням:

$$\frac{Tdx_{\text{вих}}}{dt}x_{\text{вих}} = kx_{\text{вх}} \tag{3.21}$$

Де Т – постійна часу,

k – коефіцієнт передачі ланки.

Тоді передаточна функція буде набувати вигляду:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вих(р)}}}{x_{\text{вх(р)}}} = \frac{k}{Tp+1} \tag{3.22}$$

В нашому випадку коефіцієнт передачі (k) буде дорівнювати значенню 0.033. Так як для системи стабілізації для виконання поставленої задачі потрібен редуктор з передаточних значенням 1 до 30. А значення постійної часу становить 0.05.

Тоді передаточна функція матиме вигляд:

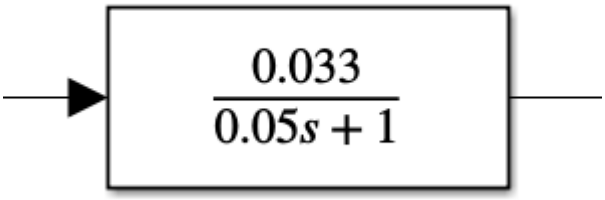


Рисунок 3.4 – Передана функція редуктора

3.3 Математичний опис навантаження системи.

Далі розглянемо вплив навантаження на електропривод загальної маси бойової частини. Для створення математичної моделі навантаження введемо два нові коефіцієнти К1 та К2, де К1 – це співвідношення кутового прискорення двигуна до сумарного моменту сил. Сумарний момент сил знаходиться за наступною формулою:

$$\text{Мсум} = \text{Мдвиг} - \text{Мнав} \tag{3.23}$$

Тоді К1 знаходиться:

$$\text{К1} = \alpha/\text{Мсум} \tag{3.24}$$

Де α – кутове прискорення

Або цю формулу можна записати як:

$$\text{К1} = 1/(J\text{двиг} + J\text{нав}) \tag{3.25}$$

Jдвиг та Jнав – це сумарний момент інерції обертаючих частин двигуна та навантаження. Об'єднаємо попередні дві формули, отримаємо:

$$\alpha = (\text{Мдвиг} - \text{Мнав})/(J\text{двиг} + J\text{нав}) \tag{3.26}$$

К2 – це відношення моменту опору навантаження до швидкості обертання двигуна, та можна записати наступним чином:

$$\text{К2} = \text{Мнав}/\omega\text{двиг} \tag{3.27}$$

Використовуючи паспортні дані вибраного двигуна, позначимо:

- Мдвиг дорівнює 3 Нм.
- ωдвиг в номінальному режимі складає 1500 об/хв.
- Мнав враховуючи передаточні значення редуктора 2 Нм.
- α при заданих параметрах складає 10.3 рад/сек.

Тоді отримаємо значення:

$$\text{Мсум} = 3 - 2 = 1 \tag{3.28}$$

$$К1 = \frac{10.3}{1} = 10.3 \tag{3.29}$$

$$К2 = \frac{2}{1500} = 0.00133 \tag{3.30}$$

Після розрахунку складемо відповідну схему в середовищі Matlab.

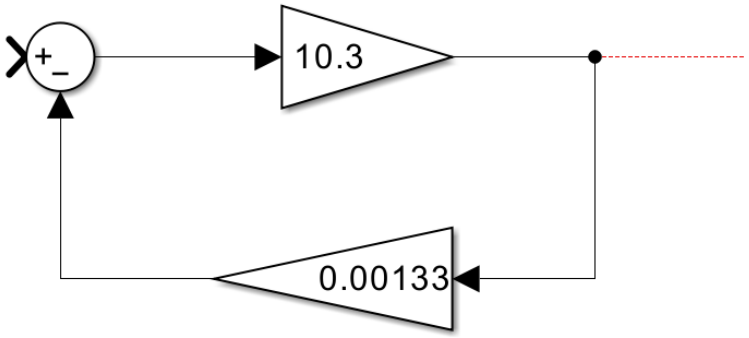


Рисунок 3.5 – схема Matlab механічного навантаження

Складемо загальну систему описаного механізму на основі отриманих раніше даних, результат моделювання представлений на (Рис. 3.6).

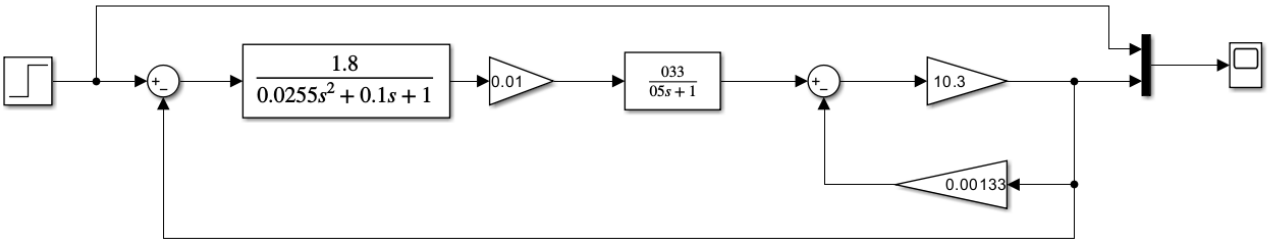


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд структури електропривода.

Замінивши сигнал на синусоїдний із частотними параметрами зміни сигналу 3 град/сек. (Рис 3.7) перевіримо реакцію системи на збурюючий вплив.

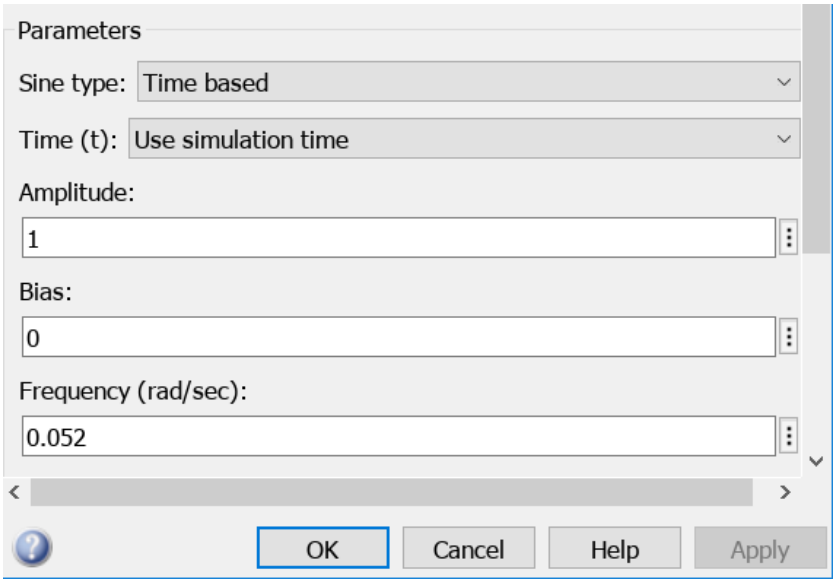


Рисунок 3.7 – параметри сигналу.

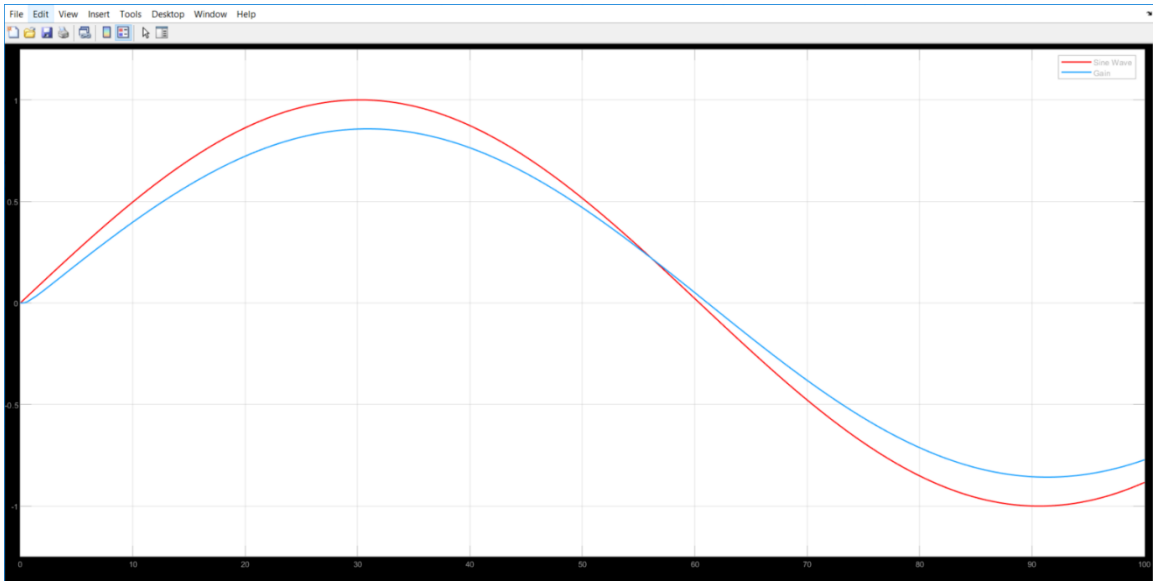


Рисунок 3.8 – Реакція системи на вхідний сигнал.

4. Синтез системи керування .

4.1 Впровадження системи із класичним регулятором.

Для синтезу системи стабілізації озброєнням розглянемо класичну схема з використанням ПІД-регулятора та зворотного зв'язку. Моделювання проводилося в середовищі Matlab. Схема представлена на (Рис 4.1).

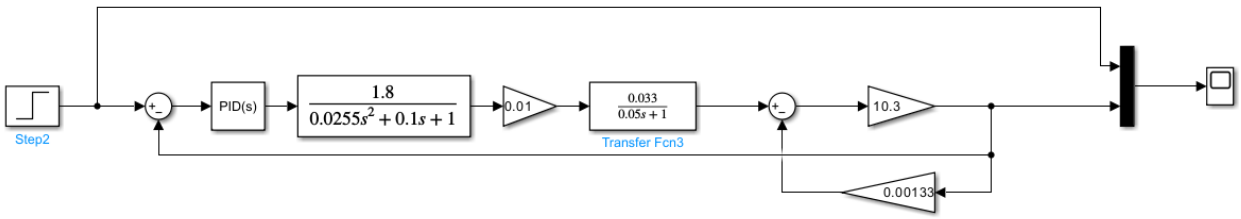


Рисунок 4.1 – Загальна схема системи стабілізації.

Далі необхідно провести налаштування ПІД-регулятора. Використаємо метод Циглера-Нікольсона, описаний у попередньому розділі в описі методів вирішення проблеми з перерегулюванням системи. Для початку підберемо значення П-коефіцієнту при якому в система буде виведена на межу стійкості, та будуть наявні незгасаючі коливання. Методом експериментального підбору отримаємо наступні значення П-коефіцієнту (Рис. 4.2), попередньо прибравши вплив інтегральної та диференційної складової.

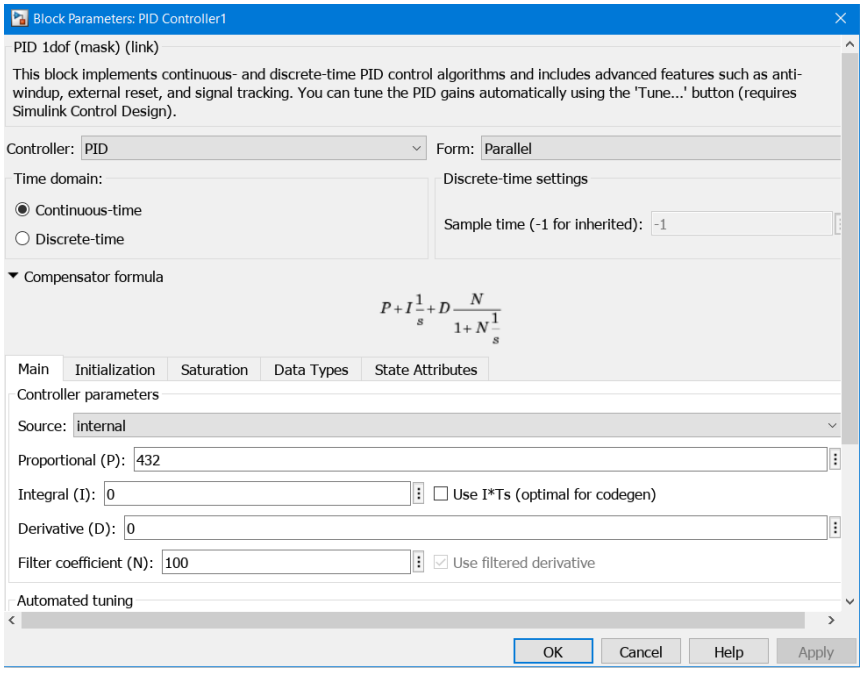


Рисунок 4.2 – Значення параметрів регулятора.

Результат реакції системи зображений на (Рис. 4.3).

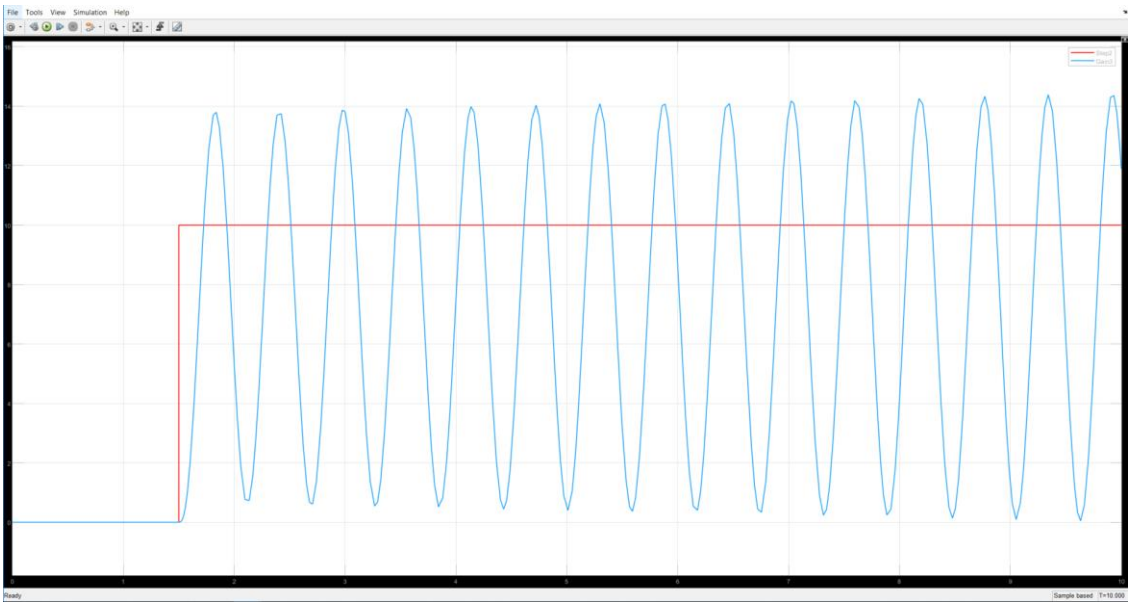


Рисунок 4.3 – Реакція системи.

Підібравши П-коефіцієнт (Kkp) та розрахувавши період коливань (Tp) який становить 0.7, розраховуємо значення для інших складових регулятора відносно наступних рівнянь:

П-регулятор: Kp = 0,55Kkp.

ПІ-регулятор: Kp = 0,45Kkp, Ti = 1,2*Kp /Tp .

ПІД-регулятор: Kp = 0,6Kkp, Kd = 2*Kp / Tp, Kd = Kp*Tp / 8.

Виберемо параметри для ПІД-регулятора, тоді :

$$Kp = 0.6Kkp = 0.6 * 432 = 259.2 \quad (4.1)$$

Для інтегральної складової:

$$Ki = 2Kp/\text{Tp} = 518{,}4/0{,}7 = 740{,}57 \quad (4.2)$$

Для диференційного коефіцієнту:

$$Kd = Kp * \text{Tp}/8 = 181{,}44/8 = 22{,}68 \quad (4.3)$$

Підставимо обчислені параметри в налаштування блоку ПІД-регулятора (Рис 4.4).

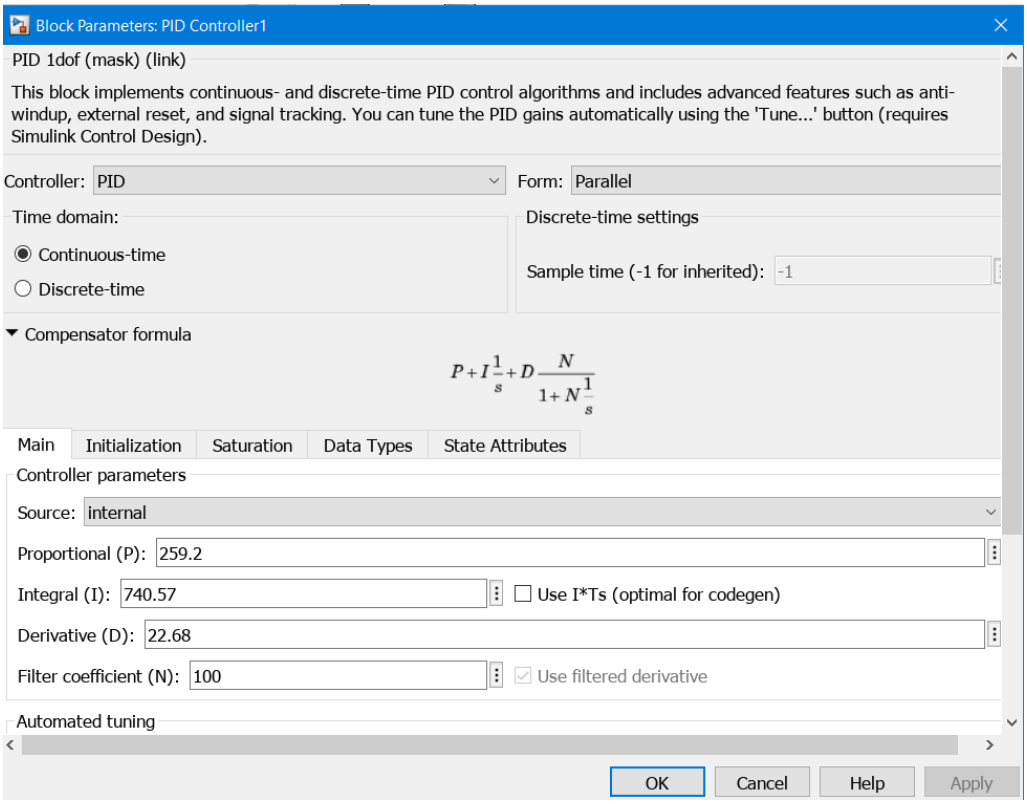


Рисунок 4.4 – Параметри коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Отримаємо наступну реакцію системи (Рис. 4.5)

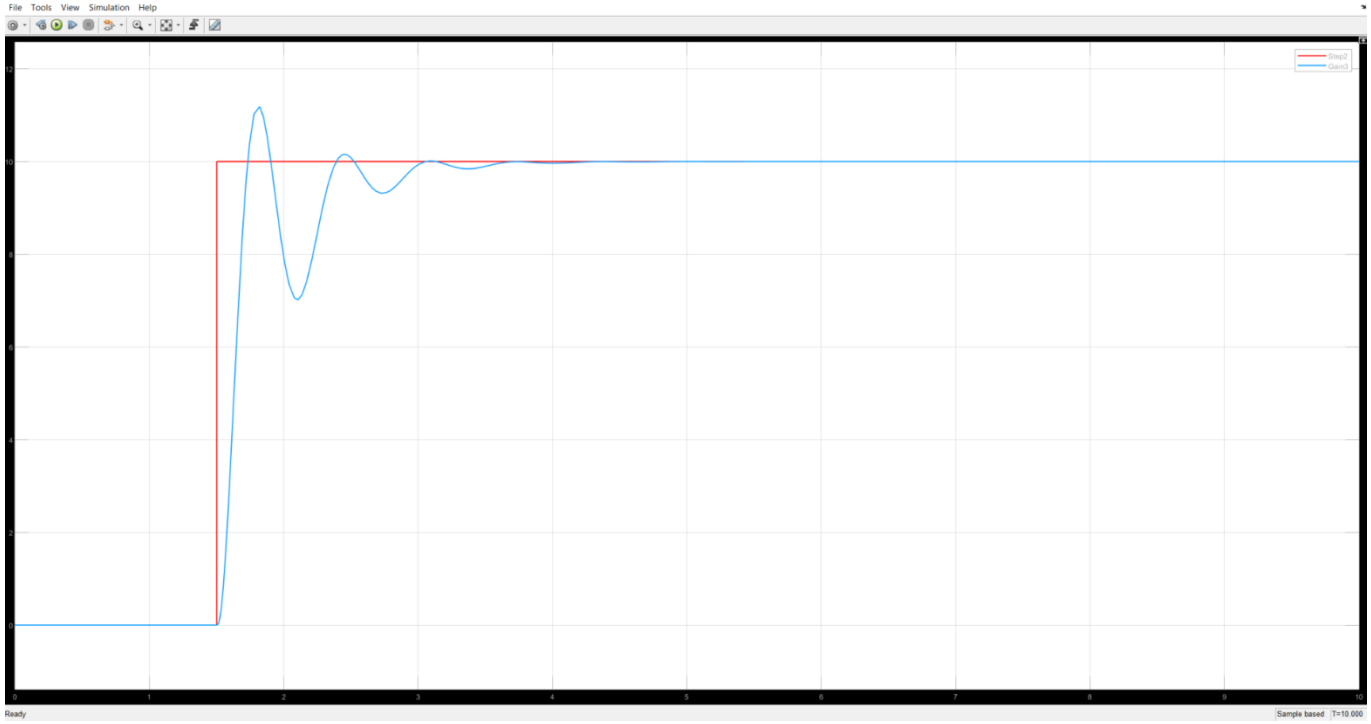


Рисунок 4.5 – Реакція системи з ПІД-регулятором.

На (Рис. 4.5) бачимо, що система з розрахованими параметрами (Рис. 4.4) ПІД-регулятора має низку недоліків у вигляді перерегулювання, що становить приблизно 12% від заданого значення. Проведемо регулювання ПІД-регулятора для більш якісного результату.

Експериментально визначили нові значення параметрів ПІД-регулятора (Рис. 4.6).

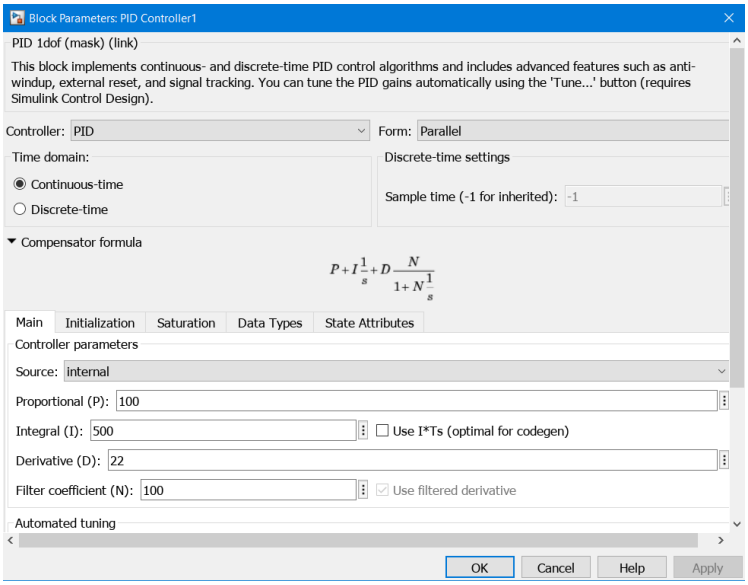


Рисунок 4.6 – Параметри ПІД-регулятора

Перехідний графік з новими коефіцієнтами зображений на (Рис. 4.7), з малюнку видно що вдалося повністю прибрати процес перерегулювання системи за рахунок налаштування коефіцієнтів.

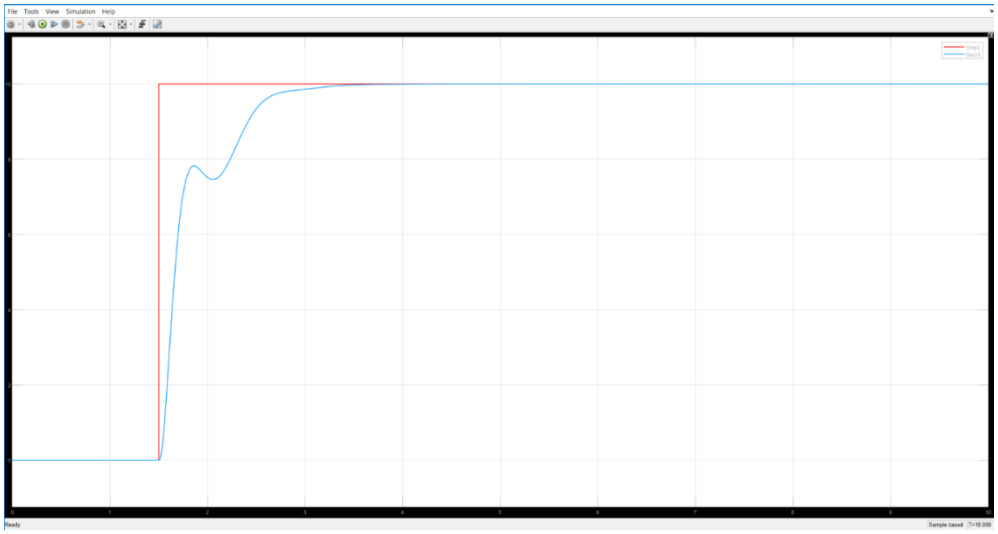


Рисунок 4.7 – Графік реакції системи з ПІД-регулятором.

Знайдемо різницю між розрахованими математично коефіцієнтами та знайденими за рахунок експериментального підбору.

П-коефіцієнт складає:

$$Nріз = 100 - \frac{(Kp2*100)}{Kp1} = 100 - \frac{(100*100)}{259,2} = 100 - 38,5 = 61,5\ \% \quad (4.4)$$

Прямопропорційна складова була зменшена на 61,5% від розрахованої величини.

І-коефіцієнт складає:

$$Nріз = 100 - \frac{(Ki2*100)}{Ki1} = 100 - \frac{(500*100)}{740} = 100 - 67,5 = 32,2\ \% \quad (4.5)$$

Інтегральна складова була зменшена на 32,2%.

Д-коефіцієнт складає:

$$Nріз = 100 - \frac{(Kd2*100)}{Kd1} = 100 - \frac{(22*100)}{22,68} = 100 - 97 = 3\ \% \quad (4.6)$$

Диференційна складова була зменшена на 3%.

Після налаштування параметрів регулятора необхідно описати вплив зовнішнього збурення на систему. Включимо в схему новий елемент який буде описувати вплив нерівності поверхні по якій рухається робот (Рис 4.8).

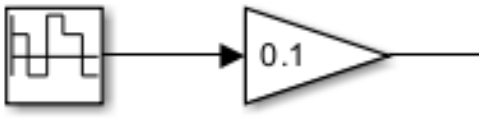


Рисунок 4.8 – Елемент зовнішнього збурення.

Налаштуємо наступні параметри елементів (Рис. 4.9). Встановимо значення розбіжності величини із значення вставки в співвідношенні не більше ніж 3%.

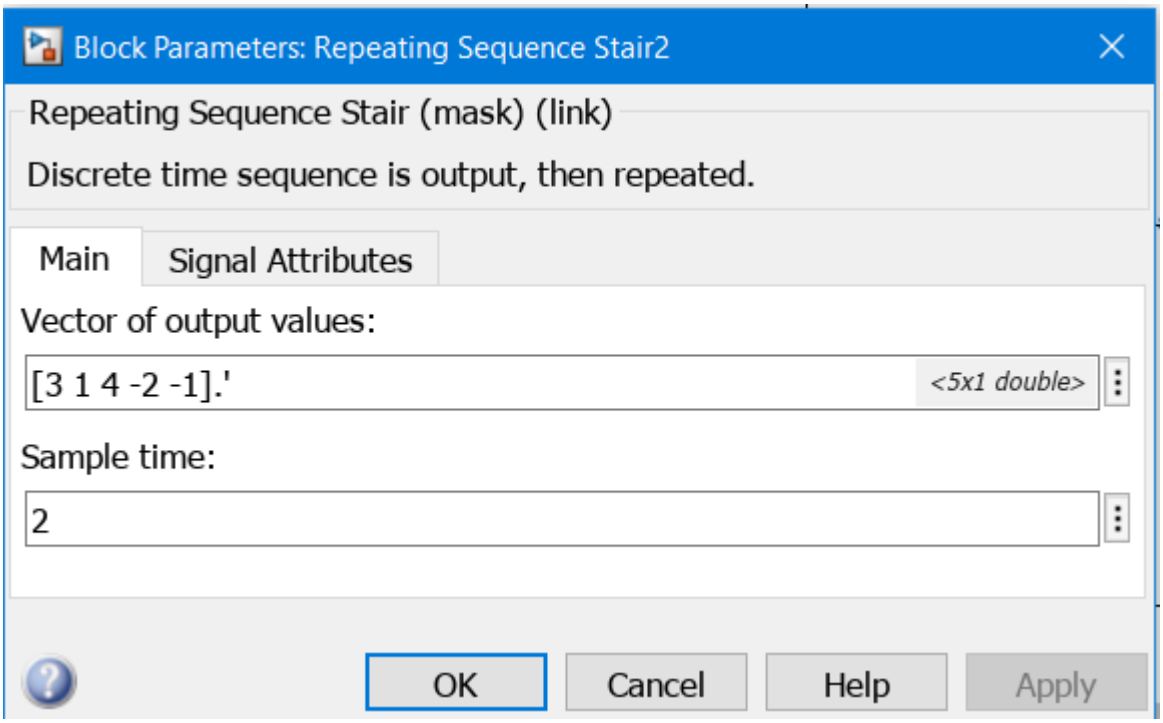


Рисунок 4.9 – Параметри елемента.

Тоді загальна система набуватиме наступного вигляду:

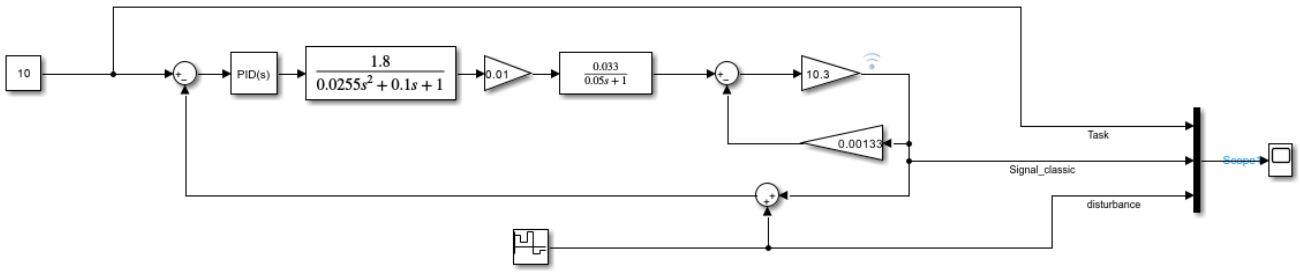


Рисунок 4.10 – Загальний вигляд класичної системи.

Розглянемо реакцію системи (Рис. 4.11) із заданими раніше параметрами (Рис 4.9).

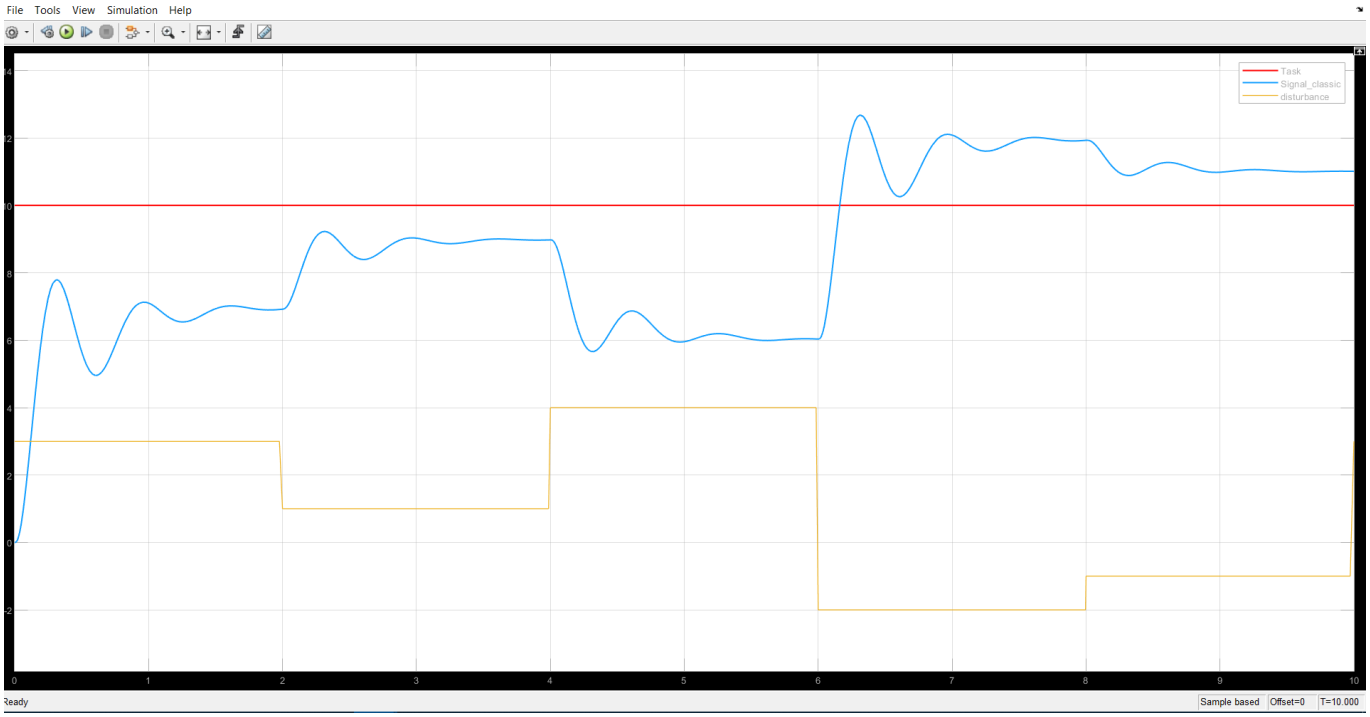


Рисунок 4.11– Реакція системи на збурення.

Так як збурення системи має характер ступеневого процесу, тому на графіку явно виражені імпульси вихідного сигналу с подальшим згладжуванням заданого параметру.

4.2 Структурний параметричний синтез системи керування.

Для подальших дослідів розглянемо нову структуру системи керування. В основу системи буде покладена класичний принцип регулювання із зворотним зв’язком. Різниця буде в додаванні нового коефіцієнту за рахунок додавання датчика в передній частині рухомої платформи реального об’єкту. Отже цей датчик спроможній ідентифікувати величину перешкоди та за описаним законом зміни кутового положення робота від глибини перешкоди створювати додатковий вплив на регулятор системи стабілізації. Даний датчик можна описати без інерційним елементом структурної схеми. Проведемо моделювання додаткового елемента.

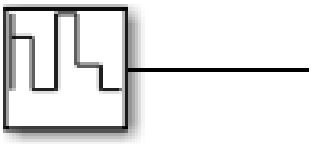


Рисунок 4.12 Вигляд додаткового елемента системи.

Бачимо, що новий коефіцієнт буде формуватися за рахунок налаштованого елементу «Repeating Sequence Stair» який повністю або частково повторює сигнал збурення , тобто момент зростання додаткового сигналу буде відрізнятися на певну величину (Δt) від моменту зростання сигналу який отримує системи від датчика положення. Ця величина (Δt) залежить від швидкості руху робота.

Розглянемо загальну структуру схеми:

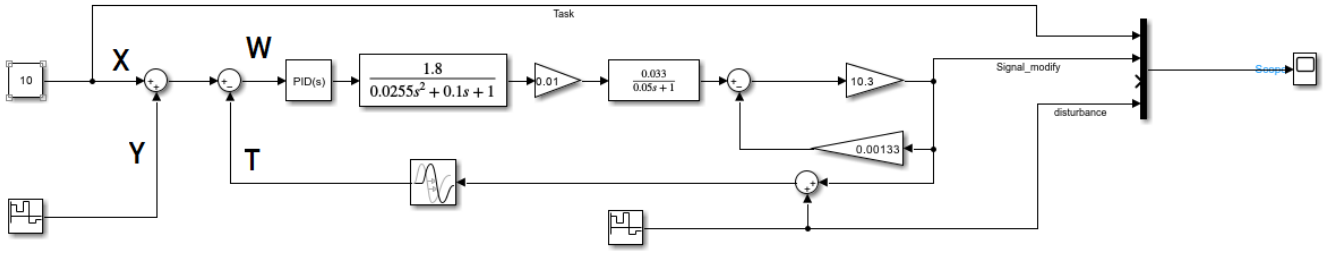


Рисунок 4.13 – Загальний вигляд системи стабілізації.

Розберемося із впливом додаткового коефіцієнту на попередню класичну схему. Опираючись на (Рис. 4.13), розглянимо залежність сигналів. Сигнал X – це сигнал вставки системи. Літерою Y позначається перетворення до необхідного масштабу значення із датчика відстані, який відповідає за формування коефіцієнту майбутнього відхилення. Літера T, сигнал зворотного зв’язку, отриманого від датчика положення.

Сигнал W формується за наступним законом:

$$W = (X + Y) - T \tag{4.7}$$

При Y = 0, закон набуває класичного вигляду різниці заданого параметру та похибки результуючого сигналу. В інших випадках коефіцієнт Y вносить коригуючий вплив на систему.

Слід зауважити, що параметри ПІД-регулятора залишаються незмінними, як в попередньому розділі про налаштування коефіцієнтів регулятора:

Kp = 100;

Ki = 500;

Kd = 22;

На разі можна отримати результат реакції системи (Рис 4.14) на вхідний сигнал.

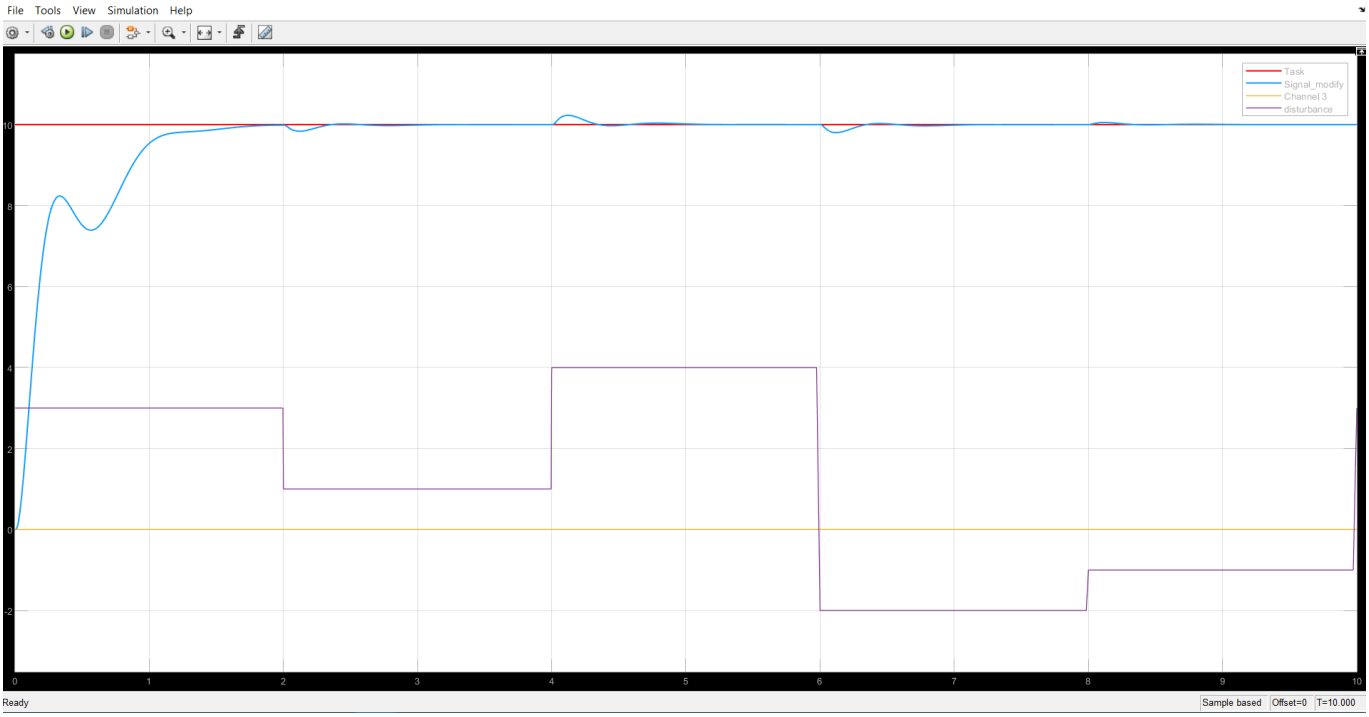


Рисунок 4.14 – Реакція системи з додатковим коефіцієнтом.

На (Рис. 4.14) червоним кольором показане значення вхідної величини регулювання. Синьою лінією позначений графік реакції системи. Фіолетовою лінією відображена збурююча величина яка діє на системи. Опираючись на отримані результати можна зробити висновок, що додатковий коефіцієнт мінімізував негативний вплив збурення на систему.

4.3 Порівняння результатів регулювання.

Для подальшого аналізу результатів необхідно скласти наступну схему, в якій будуть наявні обидві системи стабілізація, як класична так і системи с додатковим коефіцієнтом. Така система представлена на (Рис. 4.15).

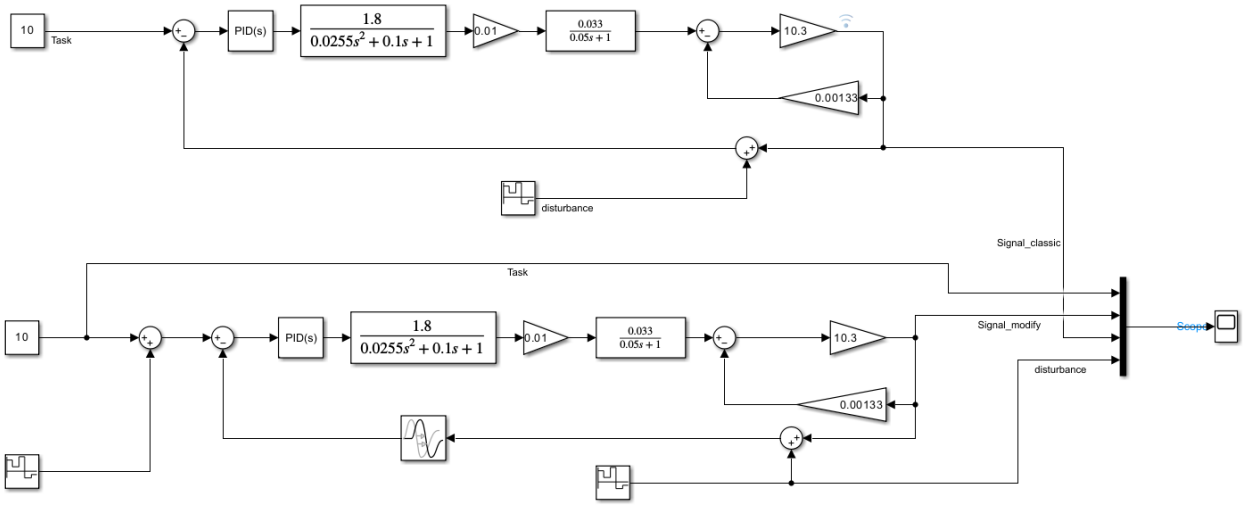


Рисунок 4.15 – Загальний вигляд системи для аналізу показників.

З малюнку видно що в верхній частині схеми знаходиться система класичного вигляду регулювання, в нижній система із додатковим коефіцієнтом. Також слід зауважити що параметри регулятора використаного в класичній схемі ідентичні параметрам із нової схеми, це необхідно для достовірності порівняння характеристик систем. Збурення що діють на ці системи, також уніфіковані та однакові.

Опираючись на (Рис 4.15) наглядно можна побачити різницю між двома нібито схожими системами за виключенням одного незначного елементу. Жовтий граф, який є реакцією класичної системи за рахунок збурень має постійне запізнення реакції системи на зміну положення, в той час як синій граф, який відтворює реакцію системи із додатковим коефіцієнтом майже повністю запобігає негативному впливу збурень.

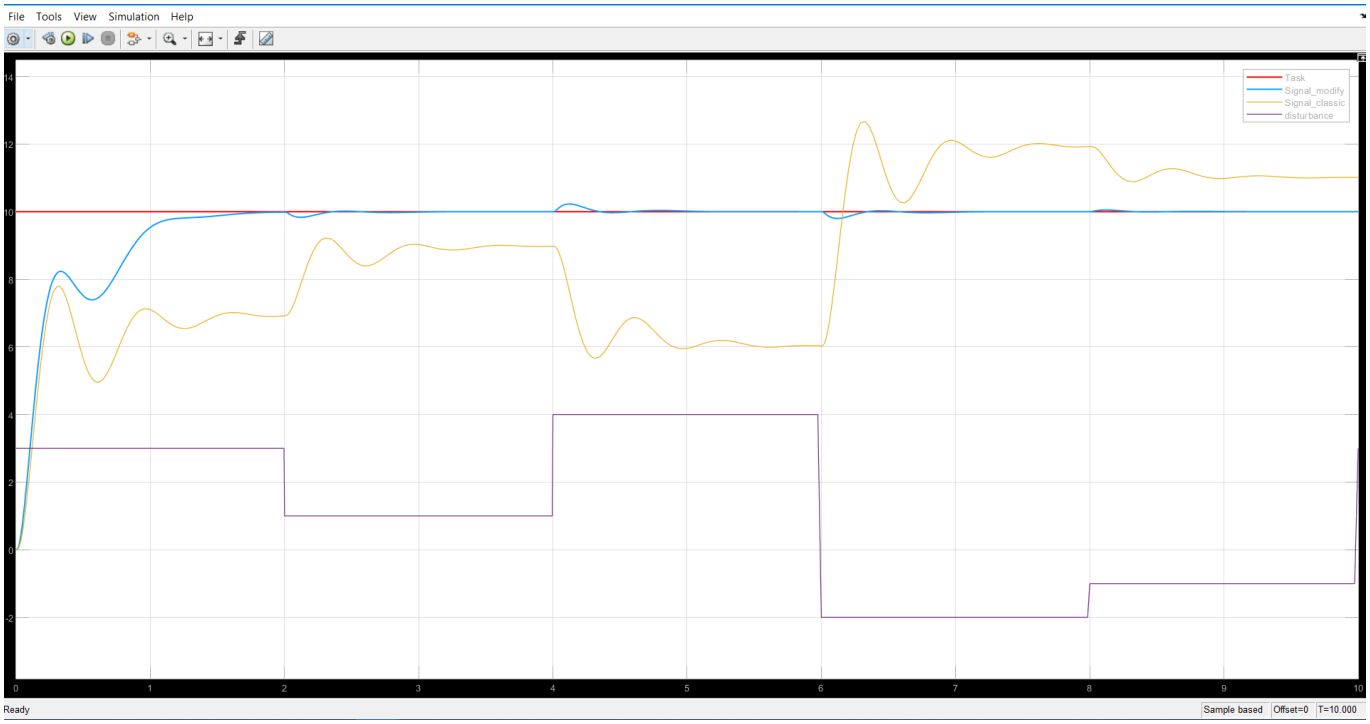


Рисунок 4.16 – Реакція систем на зовнішні збурення.

Розрахуємо період запізнення реації класичної системи, для цього на попередньому рисуноку позначимо вертикальні лінії моменту зміни збурюючої величини (Рис.4.17).

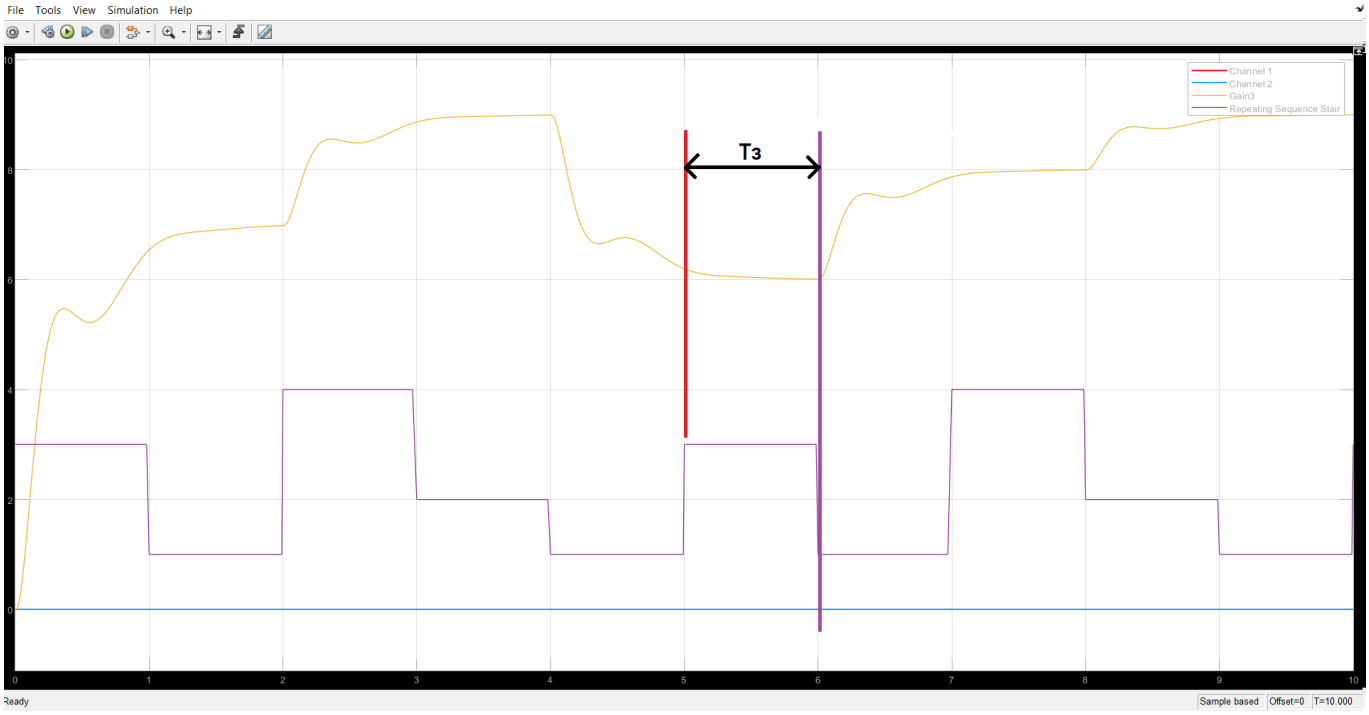


Рисунок 4.17 – Період запізнення реакції системи.

Для вираховування періоду (Тз) були побудовані дві схематичні лінії, з попереднього малюнку видно, що від момент зростання параметру збурення (червона лінія) до першої зростаючої реакції системи проходить близько 1 сек часу, тобто Тз = 1 сек.

Так як головним критерієм побудови нової системи стабілізації є швидкодія системи та її якість, опираючись на отримані результати дослідів стає можливим зробити висновок, щодо актуальності та якості використання розробленої системи стабілізації за рахунок додаткового встановлення датчика відстані. Однак можна припустити недоліки даної системи:

- Складність налаштування нової системи.
- Правильність масштабування сигналу нового датчика.
- При зміні параметрів рухомої платформи є гостра необхідність зміни закону який описує залежність величини перешкоди до можливого кута нахилу системи.

З отриманих та проаналізованих даних можна сказати, що завдання поставлені до даного дослідження виконані.

Висновок

На сьогодні дедалі частіше роботизовані військові машини використовуються на полі бою, так як мають ряд величезних переваг у порівнянні з піхотою. В той час як недоліки легкої бронетехніки вирішуються.

Данна система немає обмежень у використанні. Також великою перевагою стає можливість встановлення та модернізації систем які вже створення та працюють. Рекомендується використовувати описаний в цій роботі принцип стабілізації лише в комплексному використанні із класичними методами стабілізації так як датчик ідентифікації нерівності поверхні має особливості в використанні та обмеження в своїй точності показів.

Досліди в напрямку альтернативних методів стабілізації озброєнням на сьогодні набувають більшої актуальності та ще не до кінця вивчені. Можлива модернізація та вдосконалення принципу стабілізації за рахунок використання більш потужних обчислювальних машин та систем моніторингу рельєфу поверхонь.

В ході дослідної роботи були проведені наступні етапи:

1. Аналіз існуючих систем стабілізації озброєння.
2. Опис необхідних контурів керування.
3. Аналіз проблематики дослідження.
4. Синтез критеріїв і формулювання завдання дослідження.
5. Математичний опис об’єкта керування.
6. Побудова класичного регулятора для обраної системи.
7. Синтез нового регулятора для обраної системи.
8. Були створенні додаткові матеріали (схеми принципові, функціональні схеми автоматизації, кінематичні схеми та код для керування двигунами системи електропривода).

Результати дослідження можуть використовуватися для модернізації, або залучені в інших проектах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГО «Український мілітарний центр». General Dynamics представила новий тип бойових роботів. Режим доступу до ресурсу:https://mil.in.ua/uk/news/general-dynamics-predstavyla-novyj-typ-bojovyh-robotiv/

2. ZBROYA.info - Інформаційний портал. Залізні воїни майбутнього. Тренди ринку бойових роботів. Режим доступу до ресурсу: https://zbroya.info/uk/blog/11902_zalizni-voyini-maibutnogo-trendi-rinku-boiovikh-robotiv/

3. Інформаційно-консалтингова компанія «DEFENSE EXPRESS». ПЛАТФОРМУ "ЛАСКА. Режим доступу до ресурсу:https://old.defence-ua.com/index.php/home-page/3065-v-ukrajini-viprobuvali-bojovu-robotizovanu-platformu-laska-video

4. Інформаційно-консалтингова компанія «DEFENSE EXPRESS». Наземний дрон РСВК-М "Мисливець" від КБ "Robotics": досвід використання на Донбасі та перспективи. Режим доступу до ресурсу:https://defence-ua.com/people_and_company/nazemnij_dron_rsvk_m_mislivets_vid_kb_robotics_dosvid_vikoristannja_na_donbasi_ta_perspektivi-2613.html

5. Hilkert J.M. Inertially Stabilized Platform Technology Concepts and Principles - IEEE control systems magazine: 2008. – p. 26 - 46.

6. Єршов, Р. Д. Цифрові компаратори частоти та фази в складі системи стабілізації положення рухомої платформи – Чернігів: ЧНТУ, 2020. - с. 241-252.

7. Войтенко В., Єршов Р.Д. Моделі елементів системи електроприводів квадрокоптерів та автономних роботів – Технічні науки та технології, 2019. – с.175-187.

8. Цірук В. Г. Компенсація похибок та коригування положення гармати відносно цілі при сумісному швидкому русі башти та машини - Вісник ЖДТУ: 2018. – с. 169–172.

9. Микроконтроллер STM32F4 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html

10. Yershov, R. D., Voytenko, V. P., Bychko , V. A., Kuts , Y. V. (2019). FPGA-based Frequency and Phase Comparators for Closed-Loop Motor Position Control. Proc. 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES'2019) (pp. 290-293).

11. Yang, K.; Zhou, L.; Rong, X.; Li, Y.: Onboard hydraulic system controller design for quadruped robot driven by gasoline engine. Mechatronics 52, 36–48 (2018)

12. Lee, J.H.; Park, J.H.: Time dependent-genetic algorithm and itsapplication to quadruped's locomotion. Robot. Auton. Syst. 112,60–71 (2019).

13. Yershov, R. D., Voytenko, V. P. (2020). Pulse-Frequency Modulator with Adaptive Pulse Duration Correction. Technical sciences and technologies – Tekhnichni nauky ta tekhnolohii, 1 (19), 177-190

14. Voytenko, V. P., Yershov, R. D. (2019). Models of Elements of the Electric Drive System of the Quadrocopters and Autonomous Robots. Technical sciences and technologies – Tekhnichni nauky ta tekhnolohii, 3 (17), 175-187 .

15. Jimenez-Fernandez, A., Jimenez-Moreno, G., Linares-Barranco, A., Dominguez-Morales, M.J., Paz-Vicente, R., Civit-Balcells, A.A. (2010). Building blocks for spikes signals processing. Proc. 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'2018) (pp. 1-8).

16. Denisov, Yu., Gorodniy, O., Gordienko, V., Vershniak, L., Dymerets, A. (2018). Estimation of parameters and characteristics of power factor corrector based on pulsed and quasi-resonant converters. Tehnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 6, 38-41.

17. Voytenko, V. P., Stepenko, S. A., Velihorskyi, O. A., Chakirov, R., Roberts, D., Vagapov, Y. (2015). Digital control of a zero-current switching quasi-resonant boost converter. Proc. 2015 Internet Technologies and Applications (ITA) (pp. 365-369).

18. K. Gendreau, J. Leitner, L. Markley, W. Cash, and A. Shipley, "Requirements and options for a stable inertial reference frame for a 100 μarcsecond imaging telescope," Proc. SPIE, vol. 4852, 2003.

19. G. Downey, “Electro-optical tracking considerations II,” Proc. SPIE, vol. 5082, pp. 139–153, 2003.

20. B. Lurie, A. Ghavimi, F. Hadaegh, and E. Mettler, “System architecture trades using Bode-step control design,” AIAA J. Guid. Control Dyn., vol. 25, no. 2, pp. 309-315, Mar.–Apr. 2002.

21. Y. Otake, H. Maesaka, S. Matsubara, N. Hosoda, and T. Ohshima, Timing and low-level rf system for an x-raylaser,, Phys. Rev. ST Accel. Beams 19, 022001 (2016).

22. Sun, M.; Liu, J.; Wang, H.; Nian, X.; Xiong, H., "Robust Fuzzy Tracking Control of a Quad-Rotor Unmanned Aerial Vehicle based on Sector Linearization and Interval Matrix Approaches", ISA Transactions, vol. 80, pp. 336-349 (Sept. 2018).

23. Kline, A.; Ahner, D.; Hill, R.: The weapon target assignment prob- lem. Comput. Oper. Res. 105, 226–236 (2019).

24. Quadri, S. A.; Sidek, O., "Error and Noise Analysis in an IMU using Kalman Filter", International Journal of Hybrid Information Technology, vol. 7, no. 3, pp. 39-48 (2014).

25. Fernandes, J.J.; Selvanukar, A.A.: Kinematic and dynamic analysis of 3PPPU parallel manipulator for medical applications. Procedia Comput. Sci. 133, 604–611 (2018).

26. Valdez, F.; Vazquez, J. C.; Melin, P.; Castillo, O., "Comparative study of the use of fuzzy logic in improving particle swarm optimization variants for mathematical functions using co-evolution", Applied Soft Computing, vol. 52, pp. 1070-1083 (2016).

27. Patwardhan, A.; Prakash, A.; Chittawadigi, R.G.: Kinematic analysis and development of simulation software for nex dexter robotic manipulator. Procedia Comput. Sci. 133, 660–667 (2018)

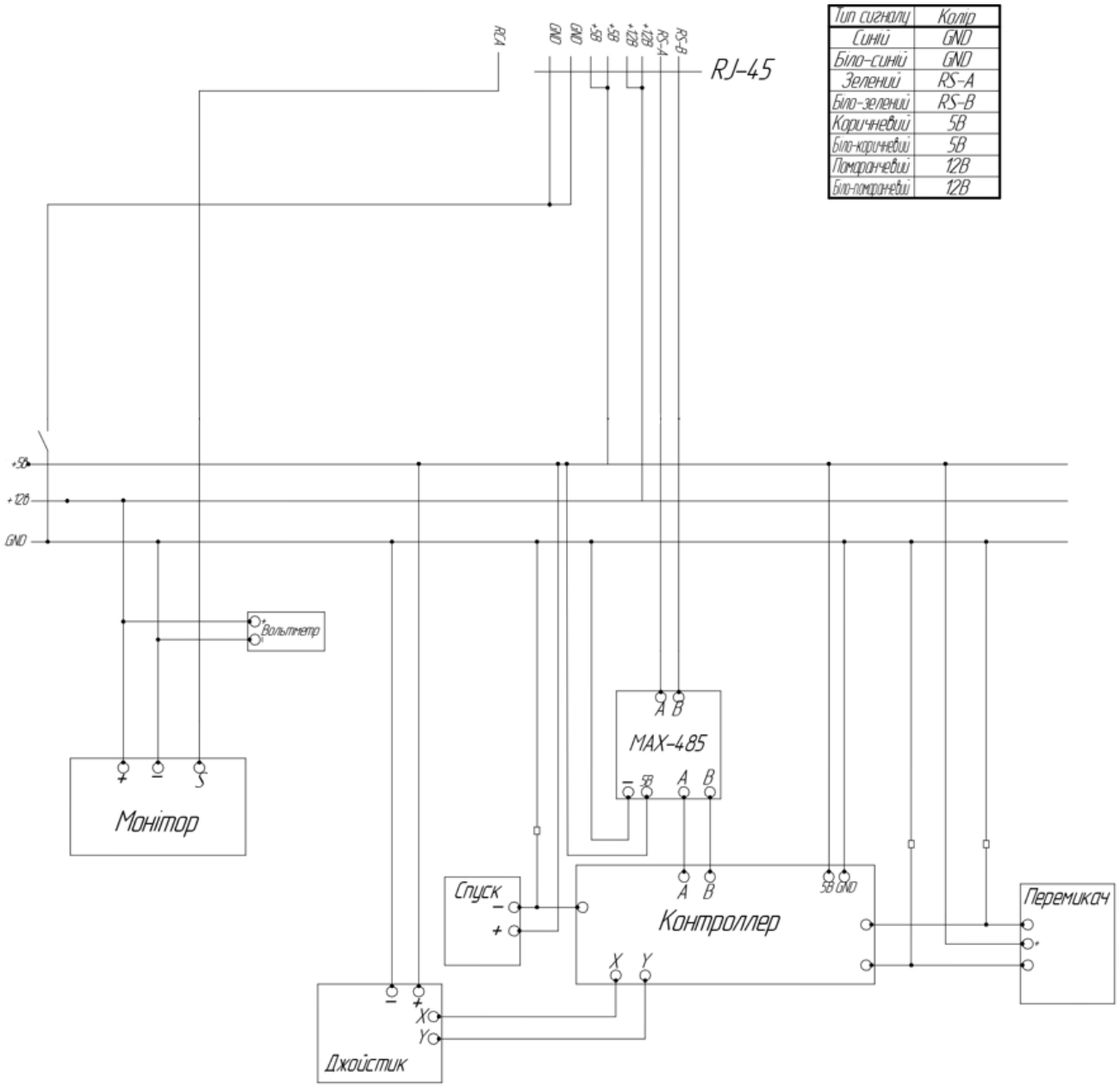
28. Zhang, G.L.; Song, M.H.: Impulsive continuous Runge–Kutta methods for impulsive delay differential equations. Appl. Math. Comput. 341, 160–173 (2019)

29. Лелюх, О.М. Моніторинг забрудненості простору з використанням БПЛА [Текст]: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня бакалавра; спец.: 151 – автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології / О.М. Лелюх; наук. кер. Г.В. Кулінченко. – Суми: СумДУ, 2021. – 64 с.

Додаток А

(Довідкова)

Електрична схема системи керування туреллю

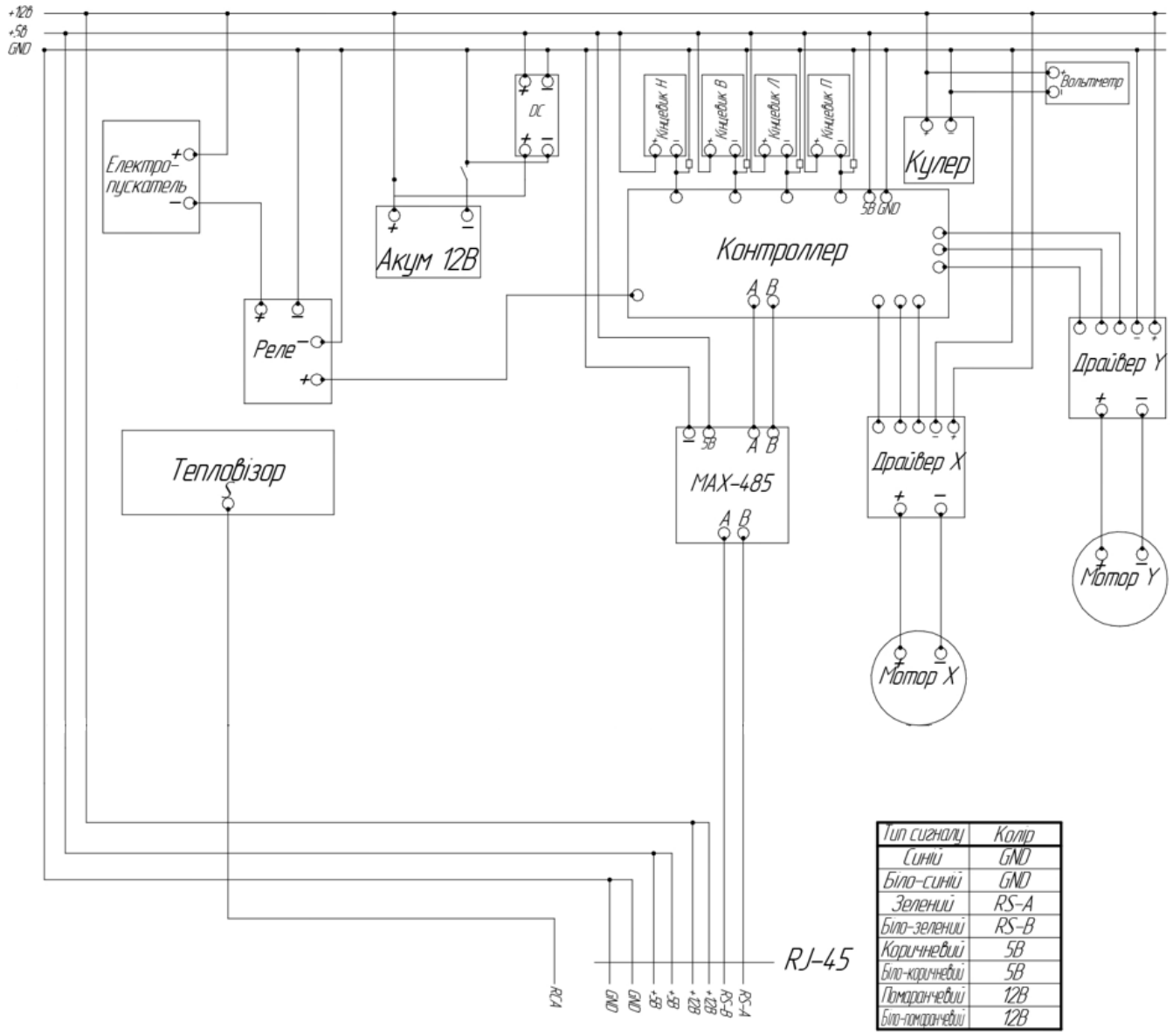


Тип сигналу	Колір
Синій	GND
Біло-синій	GND
Зелений	RS-A
Біло-зелений	RS-B
Коричневий	5В
Біло-коричневий	5В
Помаранчевий	12В
Біло-помаранчевий	12В

Додаток Б

(Довідковий)

Електрична схема пульта керування

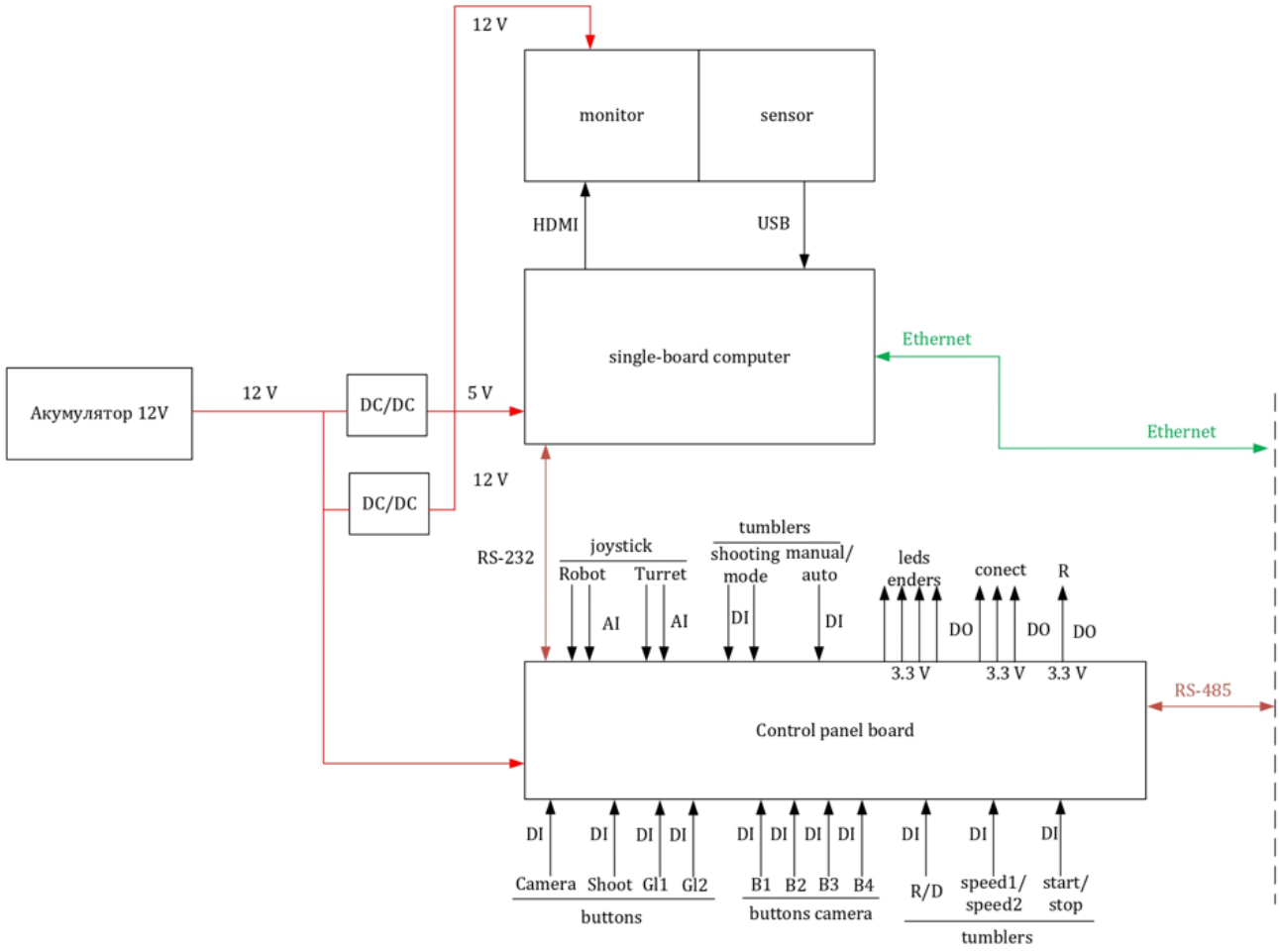


Тип сигналу	Колір
Синій	GND
Біло-синій	GND
Зелений	RS-A
Біло-зелений	RS-B
Коричневий	5В
Біло-коричневий	5В
Помаранчевий	12В
Біло-помаранчевий	12В

Додаток В

(Довідковий)

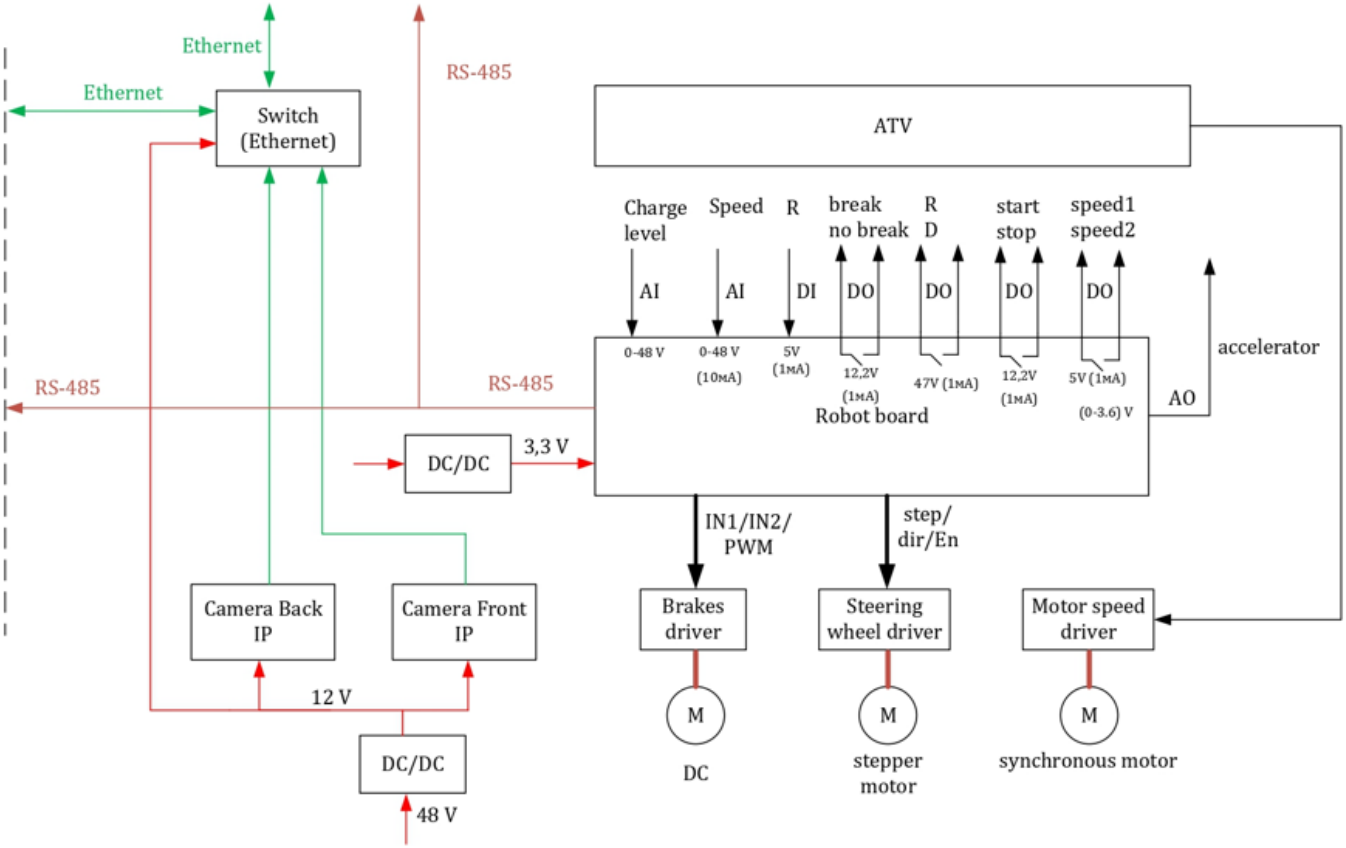
Структурна схема пульта керування



Додаток Г

(Довідковий)

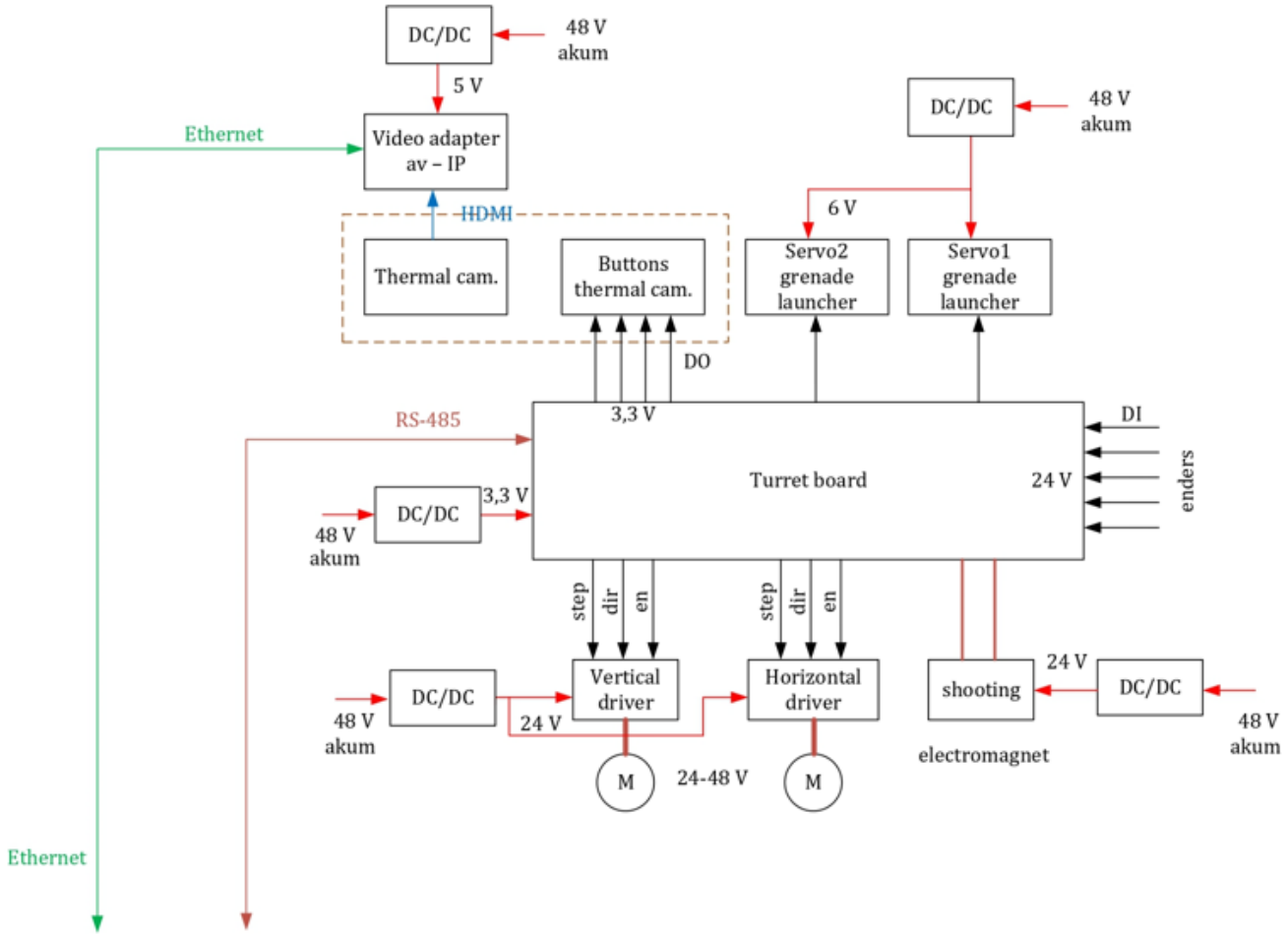
Структурна схема системи керування рухомої платформи



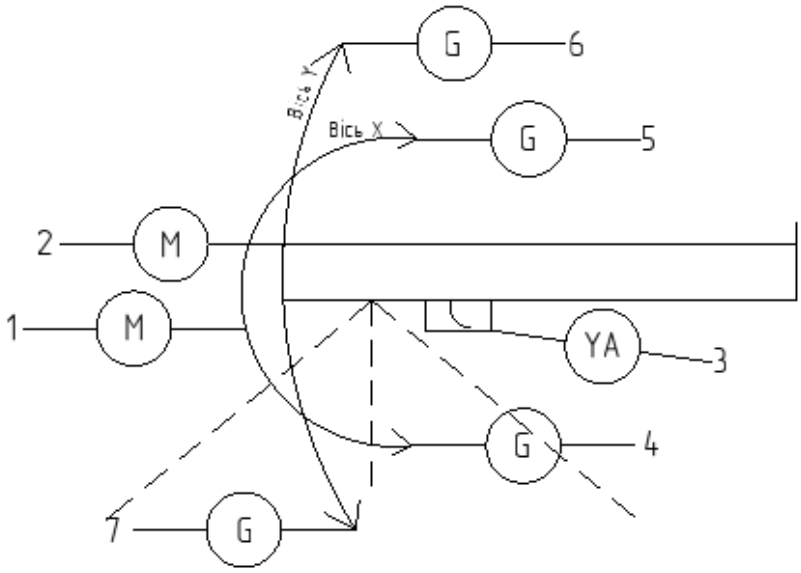
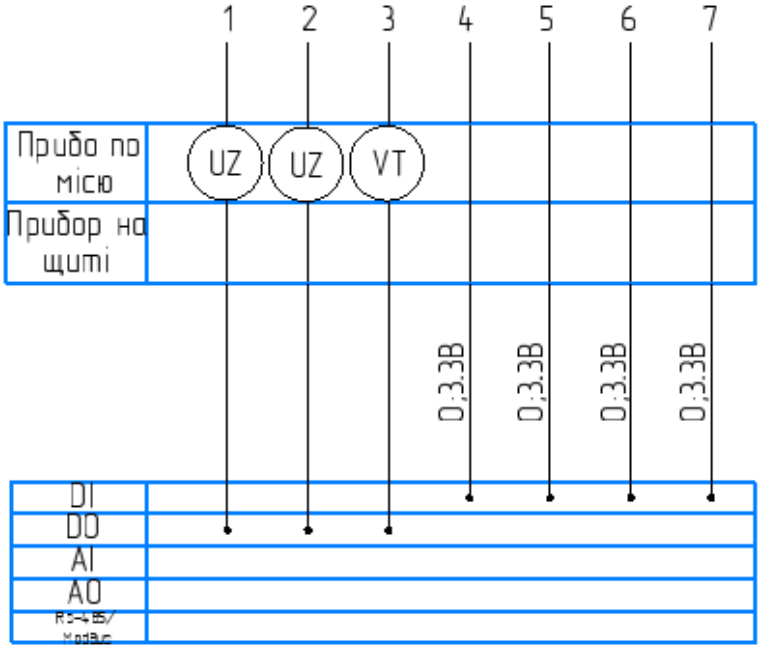
Додаток Д

(Довідковий)

Структурна схема системи керування туреллю



Додаток Е

(Довідковий)

ФСА автоматичної турелі